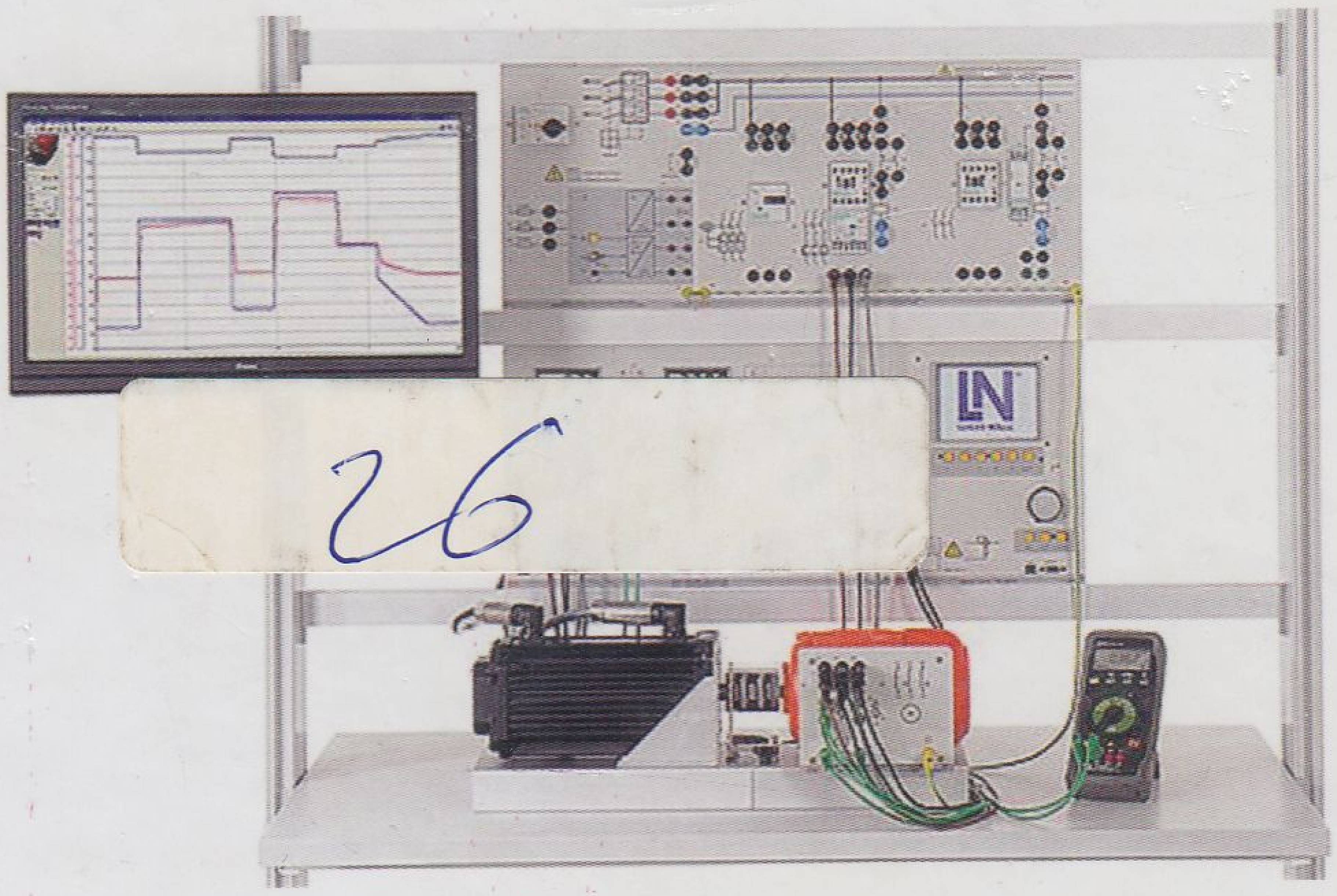
الآلات الكهربائية

والكهروميكانيكيات



دكتور

محمد عبد القادر ابوعزوم

مؤسسة عالم الرياضة
Sports World Foundation
٠٠٢٠١٠٠١٢٩٣٢٣٣

٠٠٢٠٣٥٤٠٤٤٨٠

الآلات الكهربائية
والكهروميكانيكيات

دكتور
محمد عبدالقادر ابوعزوم
أستاذ مشارك بقسم الهندسة الكهربائية
كلية الهندسة - هــون

الطبعة الأولى
2015م

الناشر
مؤسسة عالم الرياضة للنشر
ودار الوفاء لدنيا الطباعة
موبايل: 00201001293233
تليفون 002035404480 الإسكندرية

بسم الله الرحمن الرحيم

الإهداء

إلى من ربياني صغيراً.. بابا وماما

ورفاق جنة الدنيا.. أسرتي الكريمة

حفظهم الله جميعاً

مقدمة

لماذا جاء هذا الكتاب

الوفاء والعرفان لمن نحب سمة جميلة بين الطيبين المحبين والمقدرين لدور الآخرين ،وحياتنا حبلى بالمواقف واللحظات والعبر ،وفي كل محطة أشخاص أحببناهم و لازلنا نحبهم رغم مرور السنين أو رحيلهم لعالم البقاء من دنيتنا الفانية ، و أسمى الوفاء في الحياة لمن نحب نقدر و نشكر وقفاتهم الطيبة معنا .

وإذا كان الوفاء سمة رائعة بين البشر فما أروعها عندما تكون بين طلاب وأستاذهم . ولقد رأينا نحن محبي وطلاب وطالبات البروفسور د .**محمد عبدالقادر ابوعزوم** أن يكون وفائنالأستاذنا في تقديم أحد اعماله التي كان ينثوى نشرها لتري النور وتعم فائدتها لكل طلاب العلم داخل وخارج ليبيا وهذا هو الوفاء الحقيقي.

مهما قلنا وعددنا وأضفنا فلن نفي القامة الكبيرة المرحوم البروفسور د .**محمد عبدالقادر ابوعزوم**. مهما فعلنا فلا نستطيع ان نفي استاذنا المتوفى حقه فيما قدمه لنا من علم غزير وفضل وفير كان نعم الاستاذ ونعم الاب ونعم العالم. لقد كتب أستاذنا هذا الكتاب لكن الموت كان أسرع قبل أن يقدمه لأحد دور النشر . فكان من الواجب علينا نحن طلابه أن نستأذن أسرته الكريمة العريقة الأصيلة ونكمل جهد أستاذنا .

اللهم أرحمه تحت الأرض واستره يوم العرض ولا تخزه يوم يبعثون "يوم لا ينفع مال ولا بنون إلا من أتى الله بقلب سليم اللهم يمن كتابه ويسر حسابه وثقل بالحسنات ميزانه وثبت على الصراط أقدامه واسكنه في أعلى الجنان بجوار حبيبك المصطفي صلى الله عليه وسلم اللهم أجعل بوزن هذا الكتاب حسنات له يوم القيامه . بفضل دعاء كل من يقرأه او يطالعه.

نأمل ان يفيد هذا الكتاب كل من يطالعه سواء أكان ذلك من طلاب مرحلة البكالوريوس او شباب الباحثين في مرحلة الماجستير والدكتوراه وأن تنال روح الدكتور محمد عبدالقادر ابوعزوم ثواب هذه الفائدة ليهنأ بهذا الثواب في جنة الخلد إن شاء الله.

الفصل الأول

الأسس المغناطيسية والكهربائية

الأسس المغناطيسية والكهربائية

1.1 مقدمة:

يقوم عمل الاجهزة الكهرومغناطيسية أساسا على استخدام المجال المغناطيسى فى تخزين ونقل وتحويل الطاقة الكهربائية حيث يوفر الاقتران المغناطيسى وسيلة الربط اللازمة لتحقيق ذلك. ففى المحول يتم نقل الطاقة الكهربائية بين دائرتين منفصلتين بواسطة المجال المغناطيسى إما فى الآلات الكهربائية الدوارة فتتم عملية تحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية (او العكس) بواسطة المجال المغناطيسى الذى يمتاز بقدرته على تخزين ونقل وتحويل الطاقة بكثافة عالية مما ينتج عنه قدرة عالية لوحدة الحجم فى الآلات الكهربائية التى غالبا ماتستخدم المواد المغناطيسية الحديدية لتكوين الدائرة المغناطيسية اللازمة لتشكيل وتوجيه المجال المغناطيسى للآلة.

2.1 - اساسيات الكهرومغناطيسية.

من مبادئ المغناطيسية نجد ان قوة التنافر f بالنيوتن (N) بين الاقطاب المتشابهة وقوة التجاذب بين الاقطاب المختلفة تتناسب طرديا مع شدة القطبين M و 'M بالويبر (Wb) وعكسيا مع مربع المسافة بينهما r بالمتر (m) وهو ما يعرف بقانون كولوم المغناطيسى الذى يعبر عنه كما يلى:

$$f = (1/4\pi\mu)M.M'/r^2 = M.M'/(4\pi\mu r^2) \quad (N) \qquad (1.1)$$

حيث تمثل μ نفادية الوسط الذى يتدفق عبره الفيض المغناطيسى والتى يعبر عنها بحاصل ضرب النفاذية النسبية للوسط μ_r فى نفادية الفراغ μ_o (هنرى/متر) كما يلى:

$$\mu = \mu_r\mu_o \quad , \mu_o = 4\pi x10^{-7} \quad (H/m) \qquad (1.2)$$

وتعرف شدة المجال المغناطيسى او الاجهاد المغناطيسى ووحدته النيوتن/ويبر (N/Wb) او امبيرلفة/متر (At/m) بانه مقدار القوة المؤثرة على وحدة قطب شمالى شدته ويبر واحد نتيجة لوجوده فى مجال قطب مغناطيسى شدته M ويبر يبعد عنه r متر. ومن تم يمكن التعبير عن الاجهاد المغناطيسى H كما يلى:

$$H = M/(4\pi r^2) \quad (At/m) \qquad (1.3)$$

وتعرف كثافة الفيض المغناطيسى B ووحدتها التيسلا T او (Wb/m^2) بكمية الفيض المغناطيسى Φ بالويبر لكل وحدة من المساحة A بالمتر مربع والتى يخترقها الفيض. وعليه نجد ان:

$$B = \Phi/A \quad (T) \qquad (1.4)$$

ويمكن الحصول على كثافة الفيض المغناطيسى B الناشئ عن قطب شدته M عند سطح كرة نصف قطرها r يقع القطب فى مركزها من المعادلة (1.4) كما يلى:

$$B = \Phi/A = M/(4\pi\mu r^2) \qquad (1.5)$$

ومن المعادلتين (1.3) و (1.5) نحصل على العلاقة بين كثافة الفيض والاجهاد المغناطيسى كما يلى:

$$B = \mu H \qquad (1.6)$$

يؤدى مرور تيار خلال موصل طويل الى نشؤ مجال مغناطيسى يدور حول الموصل فى دوائر متحدة المركز فى اتجاه يرتبط مع اتجاه التيار خلال الموصل بقاعدة اللولب الايمن حيث يدور المجال فى اتجاه اصابع اليد اليمنى اذا كان الابهام يشير الى اتجاه التيار. وعند وضع موصل طوله l يحمل تيار قدره I عموديا على مجال مغناطيسى كثافة فيضه B نجد ان الموصل يتعرض لقوة f يرتبط اتجاهها مع كل من I و B بقاعدة اليد اليسرى حيث

يمثل الابهام القوة وتمثل السبابة المجال وتمثل الوسطى التيار. وتعطى القوة f بالعلاقة:

$$f = B.I.l \qquad (1.7)$$

وبصفة عامة اذا كان التيار I يصنع زاوية θ مع المجال B فإن القوة الناتجة على الموصل تعطى بالعلاقة:

$$f = B.I.l.\sin\theta \qquad (1.8)$$

عند انتظام كثافة الفيض يمكن الحصول على القوة الدافعة المغناطيسية ق.د.م والتى تعرف بمقدار الشغل اللازم لتحريك وحدة قطب شمالى حول مسار تدفق الفيض بضرب الاجهاد المغناطيسى فى طول المسار l. وطبقا لقانون امبير فإن هذا الشغل يساوى مجموع التيارات التى يشبكها الفيض. وعليه يمكن التعبير عن ق.د.م Φ بالامبيرلفة (At) حول مسار مغلق طوله l والاجهاد المغناطيسى عنده H والناتجة عن مرور تيار I فى ملف ذو N لفة يشبكها الفيض كما يلى:

$$F = H.l = N.I \ \ (At) \qquad (1.9)$$

عند تحريك موصل عبر مجال مغناطيسى وجد فراداى ان قوة دافعة كهربية ق.د.ك (emf) تتولد حثيا او تحتث فى الموصل. ويمكن ان يتم ذلك بتحريك الملف بالنسبة للمجال او بتغيير المجال مع بقاء الملف ساكنا. وينص قانون فراداى على ان مقدار ق.د.ك المحتثة فى الموصل يساوى معدل تغير ذلك الفيض. وينص قانون لينز على ان ق.د.ك المحتثة فى الموصل نتيجة لتغيير الفيض تنتج تأثير معاكس لتغير المجال الناتجة عنه. وعليه يمكن التعبير رياضيا عن ق.د.ك المحتثة فى موصل يشبكه فيض Φ متغير بالنسبة للزمن t كما يلى:

$$e = -\, d\Phi/dt \ \ (V) \qquad (1.10)$$

وبالنسبة لملف ذو N لفة يشبكه فيض متغيير فإن مقدار ق.د.ك المحتثة فى الملف ستكون معدل تغير الفيض مضروبا فى عدد اللفات حيث يسمى حاصل ضرب الفيض فى عدد اللفات بتشابك الفيض ووحدته الويبر- لفة (Wb.t). وعليه يمكن التعبير رياضيا عن ق.د.ك المحتثة فى ملف ذو N لفة يشبكه فيض Φ ينتج تشابك فيض قدره Ψ متغير بالنسبة للزمن t كما يلى:

$$\Psi = N\Phi \quad (Wb.t)$$

$$e = - d\Psi/dt = - Nd\Phi/dt \qquad (1.11)$$

ويتحدد اتجاه ق.د.ك المحتثة فى موصل ما عند تحريكه فى مجال مغناطيسى طبقا لقاعدة اليد اليمنى لفلمنج حيث يمثل الابهام اتجاه الحركة وتمثل السبابة المجال وتمثل الوسطى ق.د.ك.

3.1 - المواد المغناطيسية الحديدية.

يظهر التأثير المغناطيسى فى الطبيعة على مستوى ذرات المادة حيث يؤدى دوران الالكترونات حول نفسها وحول النواة الى إنشاء مجال مغناطيسى فى اتجاه محاور دورانها. ونظرا للاتجاهات العشوائية المتوازنة لدوران الكترونات ذرات معظم المواد فإن تأثيرها المغناطيسى يلغى بعضه البعض ولايظهر ذلك التأثير على مستوى ذرات وجزيئات تلك المواد. وتسمى هذه المواد بالمواد اللامغناطيسية. وفى المقابل نجد ان عدم اتزان اتجاه دوران الكترونات ذرات بعض المواد الاخرى يؤدى الى ظهور مجال مغناطيسى محصل فى ذرات تلك المواد التى تسمى بالمواد المغناطيسية والتى تنقسم بدورها الى اصناف فرعية اخرى.

وقد وجد ان الذرات المتجاورة فى المواد المغناطيسية تتجمع فى مناطق نفود مغناطيسية لتتحد فى اتجاه مجالها المغناطيسى. وفى حالة المادة المغناطيسية غير الممغنطة فأن اتجاه مجالات هذه المناطق يكون عشوائيا ومن

تم لاتظهر اى خواص مغناطيسية للمادة. اما عند تعرض هذه المواد الى مجال مغناطيسى خارجى فإن مناطقها المغناطيسية تتفاعل معه محاولة الاصطفاف فى اتجاهه حيث تسمى هذه الظاهرة بالتمغنط. ويبلغ التمغنط مداه عندما تصطف المناطق المغناطيسية تماما فى اتجاه المجال الخارجى فيما يسمى بالتشبع المغناطيسى للمادة. ويلاحظ عند ازالة المجال الخارجى ان المناطق المغناطيسية لاتعود تلقائيا الى اتجاهاتها الطبيعية الاصلية حيث تحتفظ المادة بما يسمى بالمغنطة المتبقية.

وعند وضع كتلة من مادة ما فى مجال مغناطيسى يمكن النظر الى التفاعل الذى تحدثه المادة مع المجال بإعتبار الفيض المغناطيسى الكلى ناتج عن مجالين احدهما المجال الاصلى والاخر مجال المادة. وعليه يمكن التعبير عن كثافة الفيض الناتجة من المعادلة (1.6) كما يلى:

$$B = \mu H + b \qquad (1.12)$$

حيث تمثل b التى تسمى بكثافة الفيض الذاتية للمادة مساهمة المادة فى كثافة الفيض الكلية. وتتناسب b طرديا مع الاجهاد المغناطيسى H بحيث يمكن اعادة كتابة المعادلة (1.12) كما يلى:

$$B = \mu H + aH = \mu\,(1 + a/\mu)H$$

$$B = \mu_o H, \quad \mu_{\square} = 1 + a/\mu \qquad (1.13)$$

وتبعا لقيمة a التى تحدد قابلية المادة للتمغنط تصنف المواد بصفة عامة الى ثلاثة مجموعات رئيسية هى:

أ - مواد مضادة للمغناطيسية حيث تكون a سالبة و μ اقل من الواحد قليلا كما فى النحاس والرصاص والهواء.

ب - مواد شبه مغناطيسية حيث تكون a موجبة و μ اكبر من الواحد قليلا كما فى الالومنيوم والكروم والبلاتنيوم.

ج - مواد مغناطيسية حديدية حيث تكون a موجبة و μ اكبر كثيرا من الواحد كما فى الحديد والنيكل والكوبلت.

وتكتسب المواد المغناطيسية الحديدية والتى غالبا ما تكون سبائك خاصة من الحديد ومعادن اخرى اهمية كبرى فى الهندسة الكهربائية نظرا لانها تدخل فى تصنيع غالبية الاجهزة الكهرومغناطيسية من المرحلات الصغيرة الى المولدات الضخمة. ويمكن تلخيص خواص تلك المواد فيما يلى:

1 - سهولة التمغنط وانتاج فيض كافى عند التعرض لاقل اجهاد مغناطيسى.

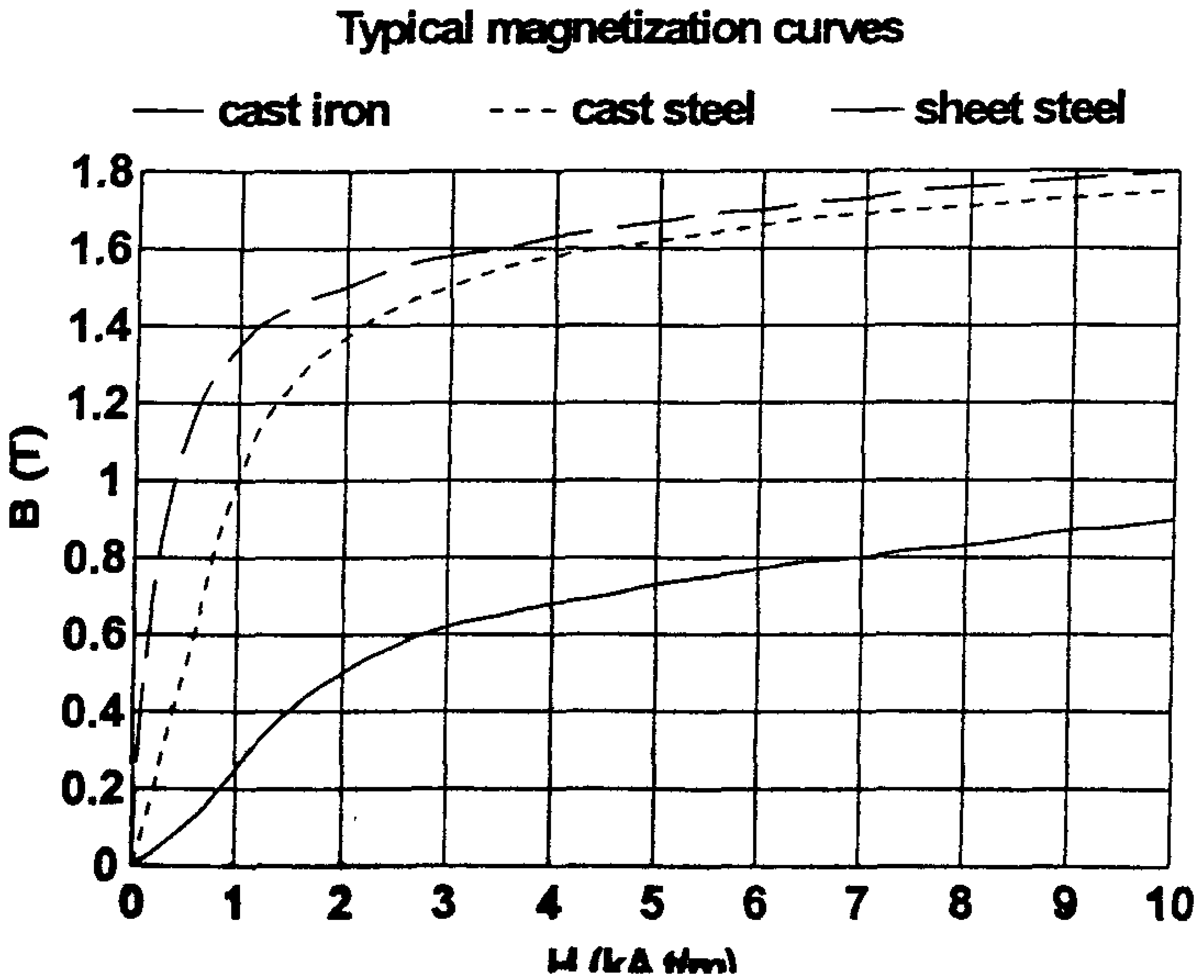
2 - التمغنط بقوة وفى نفس اتجاه المجال الموضوعة فيه المادة.

3 - تغير كثافة الفيض خلال المادة لاخطيا مع الاجهاد المغناطيسى.

4 - حدوث فقد فى الطاقة عند تعرض المادة الى مجال مغناطيسى متغير.

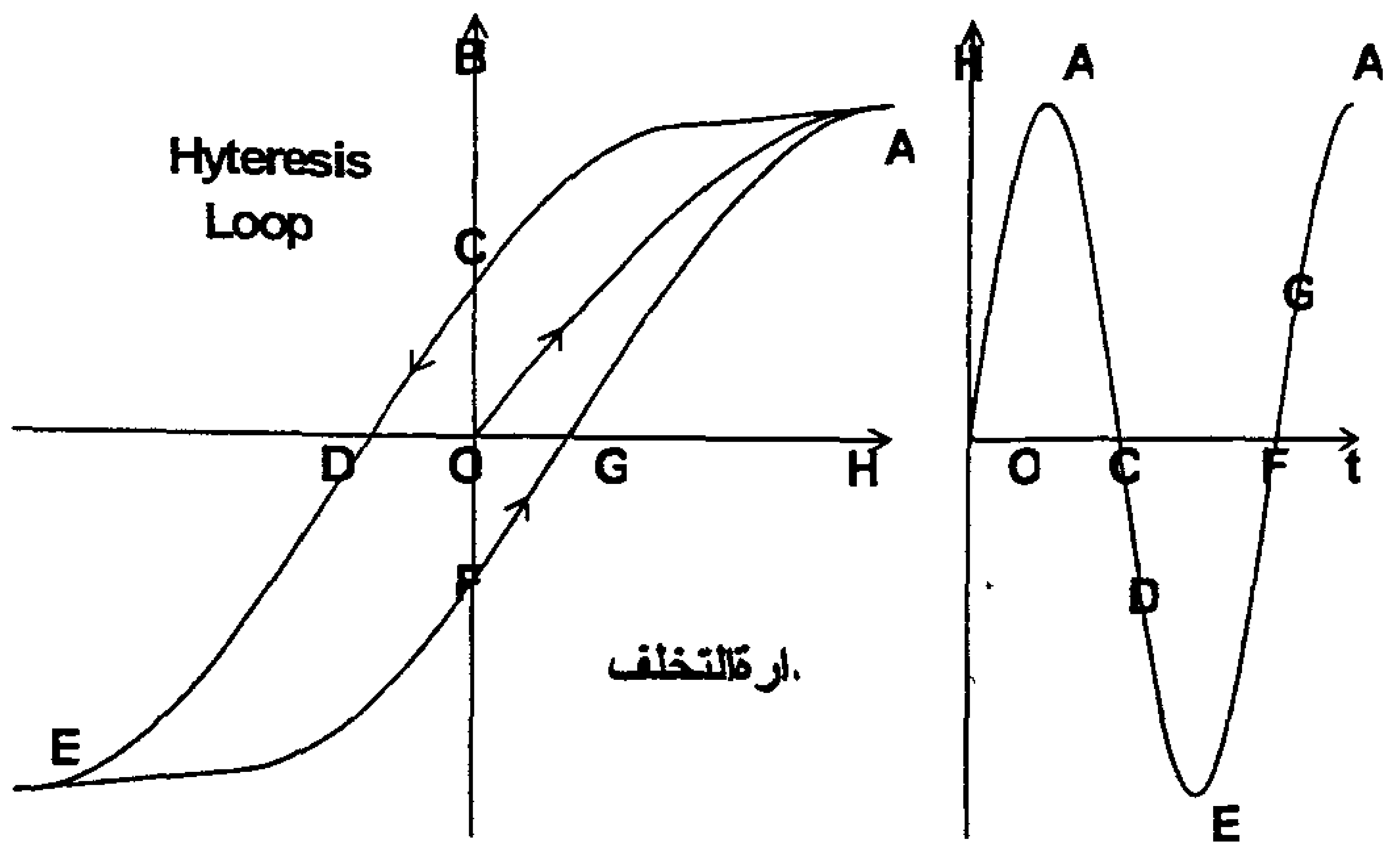
4.1 - التخلف المغناطيسى.

تتوقف قيمة النفاذية النسبية μ للمواد المغناطيسية الحديدية على قيمة الاجهاد المغناطيسى H مما يجعل العلاقة بين B و H المعطاه بالمعادلة (1.6) غير خطية حيث تبداء μ فى النقصان بعد قيمة معينة للاجهاد المغناطيسى نتيجة لتأثير ظاهرة التشبع ويسمى منحنى العلاقة بين كثافة الفيض والاجهاد المغناطيسى بمنحنى التمغنط او منحنى B-H كما فى الشكل (1).



الشكل (1) منحنى التمغنط لبعض انواع الحديد.

وتحدث ظاهرة التخلف المغناطيسى عند تعرض المادة المغناطيسية الحديدية لمجال مغناطيسى متردد. ويمكن توضيح تلك الظاهرة برسم منحنى B-H لمادة ازيلت مغنطتها مسبقا ثم وضعت فى مسار مجال ذو موجة جيبية كما فى الشكل (2). وانطلاقا من الصفر وتبعا لتغير قيمة H المترددة على طول الموجة تتبع العلاقة بين B و H المسار المغلق ACDEFG. ونلاحظ عند عودة H للصفر ان Bلاتعود للصفر وانما تبقى عند القيمة OC التى تعرف بكثافة الفيض المتبقى والتى تتطلب ازالتها زيادة H فى الاتجاه المعاكس الى القيمة السالبة OD التى تعرف بالقوة المرغمة للمادة. وتسمى الدارة ACDEFG بدارة التخلف المغناطيسى حيث تكون B دائما متخلفة عن H.



الشكل(2) دارة التخلف المغناطيسى.

واذا رسمت عدة دارات تخلف لنفس الدائرة المغناطيسية عند قيم مختلفة للقيمة العظمى للاجهاد المغناطيسى سنجد ان تلك الدارات تحيط ببعضها البعض بشكل متجانس بحيث تقع رؤس تلك الدارات جميعها على منحنى التمغنط المبين فى الشكل (1) والمتحصل عليه بالزيادة المستمرة فى قيمة الاجهاد. ويتضح من ذلك ان كثافة الفيض المتبقى والقوة المرغمة يتناسبان طرديا مع مقدار القيمة القصوى للاجهاد المتردد. وتسمى قيمة كثافة الفيض المتبقى والمتحصل عليها عند بلوغ الاجهاد حد التشبع للمادة المغناطيسية الحديدية باستبقائية المادة بينما تسمى قيمة القوة المرغمة عندها بمراغمة المادة.

وتسمى الطاقة المستنفذة فى عملية تمغنط المادة المغناطيسية الحديدية بمجال متردد بفقد التخلف المغناطيسى حيث تمثل المساحة المحصورة بدارة التخلف المغناطيسى فقد التخلف لكل وحدة حجم فى الدورة الواحدة. ويتناسب فقد التخلف المغناطيسى الذى يؤدى الى رفع درجة حرارة المادة المغناطيسية الحديدية طرديا مع كل من حجم المادة وتردد الاجهاد f والكثافة العظمى للفيض B_{max} ونظرا لان علاقة B-H هى علاقة لاخطية

ومتغيرة فإنه من الصعب تحديد مساحة دارة التخلف او استنتاج علاقة رياضية بسيطة لحسابها. ولذلك يمكن حساب فقد التخلف المغناطيسى لكل وحدة حجم باستخدام قانون ستاينمز التجريبى كما يلى:

$$P_h = k_h f(B_{max})^n \quad (W/m^3) \qquad (1.14)$$

حيث تتوقف قيمة الثابت k_h على جودة المادة المغناطيسية ومعدل كثافة الفيض المتعرضة له. ويتراوح الثابت n الذى يعرف بمعامل ستاينمز بين 1.5 و 2.5 لمعدلات كثافة الفيض المعتادة فى الآلات الكهربائية. وبصفة عامة تعتمد قيمة فقد التخلف على تركيبة المادة حيث تمتاز السبائك المصنوعة من الحديد والنيكل مثلا بضيق دارة التخلف ومن ثم صغر فقد التخلف فيها ، وهو كذلك يتأثر بالمعالجة الحرارية والميكانيكية للمادة.

5.1 - التيار الدوامى.

طبقا لقانون فراداى نجد عندما يشبك مجال مغناطيسى متردد كتلة مستطيلة المقطع من مادة مغناطيسية موصله مثل الحديد ان ق.د.ك تحتث فى الكتلة محدثة تيار دوارا يسمى بالتيار الدوامى يمر داخل الكتلة فى مسار مغلق عمودى على اتجاه المجال. وينتج عن سريان التيار الدوامى فقد فى الطاقة فى مقاومة مساره داخل الكتلة يسمى بفقد التيار الدوامى يؤدى الى تسخين الكتلة.

ويتناسب فقد التيار الدوامى طرديا مع مربع ق.د.ك المحتثة وعكسيا مع مقاومة مساره العمودى على المجال. وعليه يمكن تقليل فقد التيار الدوامى الى حد كبير بتقليل ق.د.ك المحتثة وتكبير مقاومة مسار التيار والتى تعنى تقليل مساحة ذلك المسار. فاذا تم استبدال كتلة الحديد المصمتة بحزمة من رقائق الحديد فسوف يؤدى ذلك الى تقليل ق.د.ك الفعالة وزيادة مقاومة المسار الفعال. وعادة مايكون سمك هذه الرقائق حوالى 0.4 مم ويتم عزلها عن بعضها البعض بطبقة رقيقة من الورنيش. وعلى سبيل المثال يؤدى

تقسيم الكتلة المصمته الى خمسة رقائق الى تخفيض فقد التيار الدوامى الى 4٪ فقط من قيمته للكتلة المصمته. ويؤدى تقسيم الكتلة الى رقائق الى زيادة مساحة مقطعها حيث تعرف النسبة بين المساحة الفعلية المشغولة بالرقائق الى مساحة المقطع الكلية بمعامل الرص.

ويتناسب فقد التيار الدوامى مع مربع مساحة مقطع المادة المغناطيسية الحديدية العمودى على اتجاه المجال ومربع كل من التردد f والكثافة العظمى للفيض B. كما انه يتناسب عكسيا مع مقاومية المادة. ويمكن حساب قيمة فقد التيار الدوامى لكل وحدة حجم من العلاقة التالية:

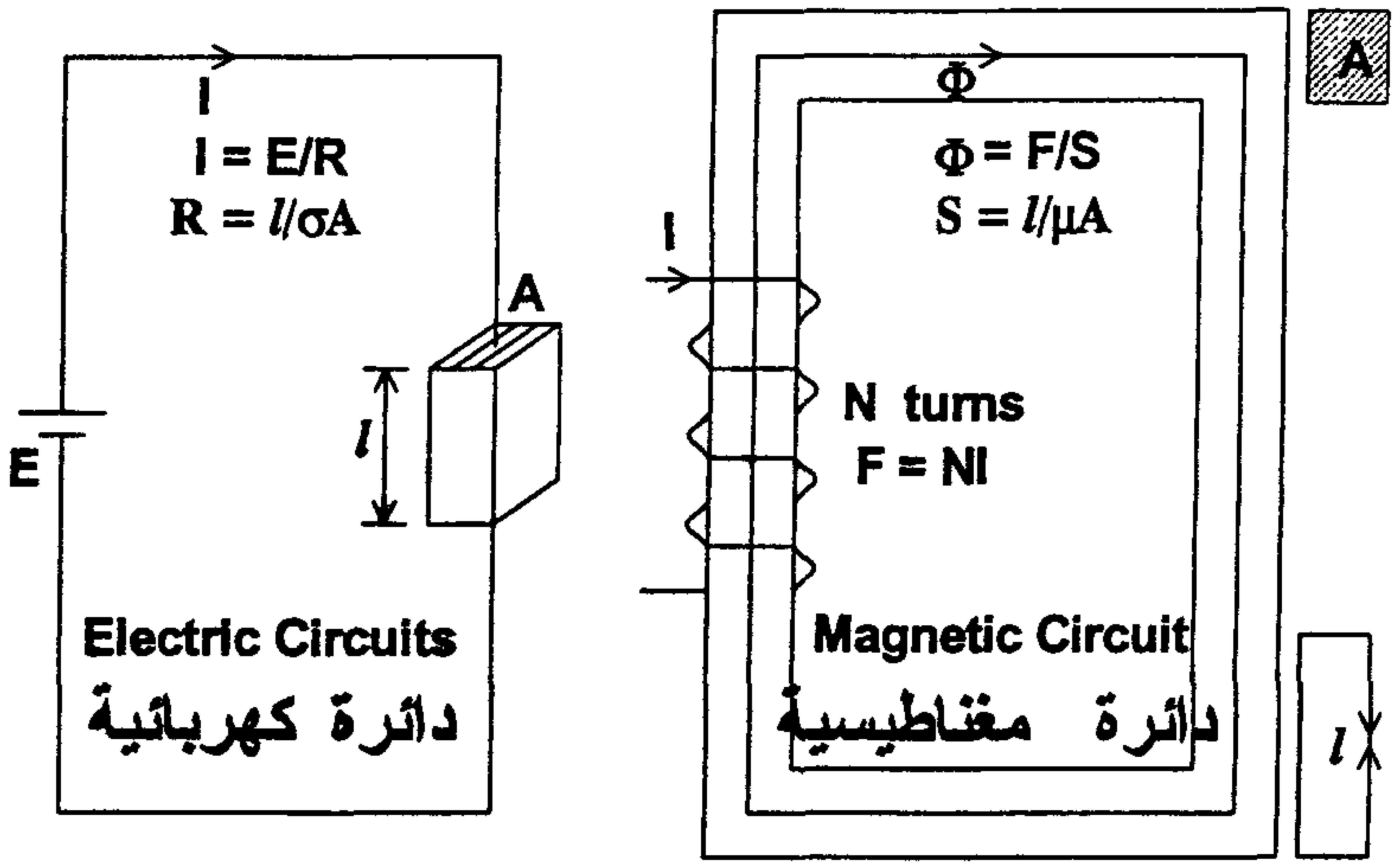
$$P_e = k_e f^2 (B_{max})^2 \quad (W/m^3) \tag{1.15}$$

حيث يعتمد الثابت k_e على مقاومية المادة وسمك الرقائق وهو يتناسب عكسيا مع المقاومية وطرديا مع سمك الرقائق. ووفقا لقانون لينز نجد ان التيار الدوامى ينتج تأثيرات مغناطيسية معاكسة للفيض الاصلى مما يؤدى الى تغيير جذرى فى توزيع تدفق ذلك الفيض خلال الكتلة عند الترددات العالية وان كان هذا التغيير اقل عند الترددات المنخفضة. ويمكن الحد من فقد التيار الدوامى باستخدام مواد ذات مقاومة عالية مثل سبائك الحديد والسيلكون. وجير بالذكر ان ظاهرة التيار الدوامى تشكل اساس عمل بعض اجهزة قياس الطاقة ومكابح التيار الدوامى.

6.1 - الدوائر المغناطيسية.

تتكون الدائرة المغناطيسية من مسار مقفل للفيض المغناطيسى غالبا ما يكون من الحديد ويسمى القلب او اللب وعادة ما ينشاء الفيض المتدفق فى اللب نتيجة لمرور التيار فى ملف الاثارة الذى يحيط باللب ملفوفا عليه. ومن تعريف ق.د.م على انها الشغل اللازم لتحريك وحدة القطب المغناطيسى نجد ان ق.د.م فى الدائرة المغناطيسية تناظر تماما ق.د.ك فى الدئرة

الكهربائية لان كليهما يعتبر مصدرا للطاقة فى الدائرة. ويناظر الفيض المغناطيسى المتدفق فى لب الدائرة المغناطيسية التيار الكهربائى المتدفق فى موصلات الدائرة الكهربائية. وتقابل الممانعة فى الدائرة المغناطيسية المقاومة فى الدائرة الكهربائية وكما هو موضح فى الشكل (3).



الشكل(3) الدائرتين الكهربائية والمغناطيسية.

ويلخص الجدول(1.1) الاتى اوجه الشبه بين الدوائر الكهربائية والمغناطيسية:

الدائرة الكهربائية	الدائرة المغناطيسية
ق.د.ك: E (V)	ق.د.م: F (At)
التيار: I (A)	الفيض: Φ (Wb)
الموصلية: $\sigma\ (\Omega.m)^{-1}$	النفاذية: μ (H/m)
المقاومة: $R = l/\sigma A\ (\Omega)$	الممانعة: $S=l/\mu A$ (At/Wb)
قانون اوم: $I = E/R$	قانون اوم: $\Phi = F/S$

الجدول 1.1 اوجه التشابه بين الدائرتين الكهربائية والمغناطيسية.

وكما فى الدوائر الكهربائية يمكن استخدام قانون اوم وقانونا كيرشوف الاول والثانى لتحليل الدوائر المغناطيسية. ويجب ملاحظة انه مع ذلك تختلف الدائرة المغناطيسية عن الدائرة الكهربائية فيما يلى:

1 - فى الدائرة الكهربائية يسرى التيار فعليا من نقطة معينة حتى يعود اليها. وعلى العكس من ذلك ينشاء الفيض فى الدائرة المغناطيسية ويظل راكدا داخل الدائرة دون ان يسرى فيها. وتبعا لذلك يصحب مرور التيار فى الدائرة الكهربائية فقد فى الطاقة فى مقاومتها. بينما لايصحب نشؤ الفيض فى الدائرة المغناطيسية اى فقد فى ممانعتها.

2 - لايمكن قصر الفيض المغناطيسى على المرور فى مسار محدد مثلما يحدث بالنسبة للتيار الكهربائى الذى يمر فى موصل محدد دون ان يتسرب منه خلال الهواء العازل. اما فى حالة الفيض المغناطيسى حيث يعتبر الهواء شبه موصلا للفيض المغناطيسى فقد يصل الفيض المتسرب خلال الهواء الى 20٪ من الفيض الكلى.

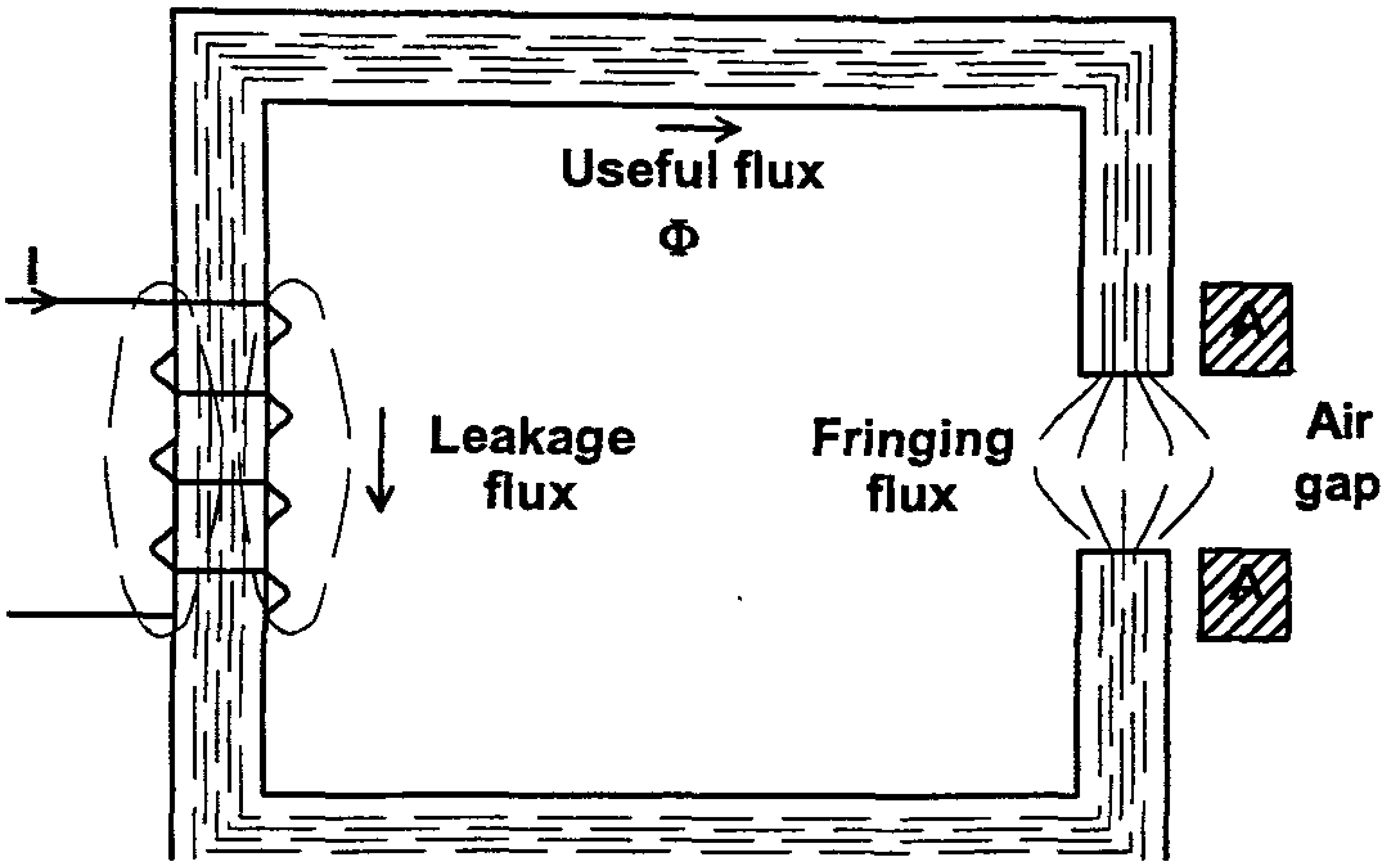
3 - نظرا لصغر مساحة مقطع الموصل مقارنة بطوله يمكن افتراض انتظام توزيع التيار الكهربائى على مقطع الموصل وبالتالى يمكن حساب مقاومة الموصل بدقة ويسر. اما فى حالة الفيض المغناطيسى فتكون مساحة مقطع المسار كبيرة مقارنة بطوله ولذلك لايكون الفيض منتظم التوزيع على المقطع وبالتالى يكون من الصعب حساب الممانعة بدقة.

4 - بينما لاتعتمد موصلية موصل التيار ومن تم مقاومته على فرق الجهد نجد ان نفاذية مسار الفيض والذى عادة ما يكون من مادة مغناطيسية حديدية ومن تم ممانعته تعتمد على ق.د.م للدائرة المغناطيسية.

7.1 - التهذب وتسرب الفيض.

تحتوى الدوائر المغناطيسية لغالبية الآلات الكهرومغناطيسية على ثغرات هوائية تترك بصفة متعمدة نتيجة لمتطلبات التشغيل او بصفة حتمية تفرضها متطلبات التصنيع. وفى جميع الاحوال يؤدى وجود الثغرة الهوائية فى الدائرة المغناطيسية الى ادخال مسارات ذات ممانعة مغناطيسية كبيرة لايمكن اهمال تأثيرها. وبالنظر الى الدائرة المغناطيسية المبينة فى الشكل (4) نجد انه نتيجة للمانعة الكبيرة للتغرة الهوائية فإن فرق الجهد المغناطيسى عبر الثغرة قد يبلغ من الكبر ما يسبب فى انتفاخ خطوط الفيض عبر التغرة الهوائية الى الخارج لتغطى مساحة اكبر من مساحة مقطع التغرة وهو مايعرف بظاهرة التهذب ويكمن تأثير التهذب فى جعل كثافة الفيض فى التغرة الهوائية اصغر مما تحدده مساحة مقطع وجهى التغرة الهوائية نظرا لان ظاهرة التهذب تزيد من مساحة المقطع الفعالة للتغرة الهوائية.

واذا كانت التغرة الهوائية مستطيلة المقطع وكان طولها اقل من 10٪ من محيطها وكانت ابعاد مقطع وجهى التغرة متساوية يمكن تقريبيا حساب ابعاد المقطع الفعال للتغرة باضافة طولها الى ابعاد مقطع الوجه. اما اذا كانت ابعاد احد الاوجه اصغر من الآخر فيمكن حساب ابعاد المقطع الفعال للتغرة باضافة ضعف طولها الى ابعاد مقطع الوجه الاصغر. وبالنسبة للمقاطع الدائرية يضاف طول التغرة الهوائية الى قطر الوجه اذا كان قطرى وجهى التغرة متساويين او يضاف ضعف طولها الى قطر الوجه الاصغر قطرا اذا كانت الاوجه غير متساوية القطر.



الشكل (4)التهذب والتسرب المغناطيسى.

ويلاحظ فى الحياة العملية ان الفيض الكلى الناشئ عن مرور التيار فى ملف الاثارة الملفوف حول لب الدائرة المغناطيسية يكون دائما اكبر من الفيض المفيد المتدفق فى اللب. ويرجع السبب فى ذلك الى ان جزء غير مفيد من الفيض يسمى بالفيض المتسرب يتسرب فى مسارات عشوائية خارج لب الدائرة كما هو موضح فى الشكل (4). وتسمى نسبة الفيض الكلى الى الفيض المفيد بمعامل التسرب.

8.1 - الحث الكهرومغناطيسى.

يقوم عمل الآلات الكهربائية بمختلف انواعها اساسا على ظاهرة الحث الكهرومغناطيسى التى توصل اليها فراداى فى قانونه الشهير. ويمكن الحصول على ق.د.ك بالحث الكهرومغناطيسى ديناميكيا او استاتيكيا. وفى طريقة الحث الديناميكى تتولد ق.د.ك عند حدوث حركة نسبية بين الموصل والمجال. فإذا تحرك موصل طوله l فى مجال مغناطيسى كثافته B عموديا على اتجاه المجال لمسافة قدرها dx فى زمن قدره dt بسرعة $v=dx/dt$ فإن المساحة التى يمسحها الموصل اثناء حركته هى $l dx$ والفيض الذى يقطعه $d\Phi=Bl dx$ ويكون مقدار ق.د.ك المحتثة فيه كما يلى:

$$e = d\Phi/dt = d(Bl\,dx)/dt$$

$$e = Bl\,dx/dt = Blv \qquad (1.16)$$

واذا كان اتجاه سرعة الموصل يصنع زاوية θ مع اتجاه المجال فإن:

$$e = Blv\,\text{Sin}\,\theta \qquad (1.17)$$

. ويقوم عمل المولدات الكهربائية اساسا على تطبيق فكرة الحث الديناميكى حيث تتولد ق.د.ك حثيا فى موصلات عضو الآلة المنتج نتيجة لوجود حركة نسبية بينه وبين عضو المجال.

وعمليا يرتبط الحث الاستاتيكى حيث تحتث ق.د.ك دون اى حركة بوجود ملف او اكثر حيث يؤدى مرور تيار متردد i فى ملف ذى N لفة الى انشاء فيض مغناطيسى قدرهΦ فى ذلك الملف منتجا بذلك تشابك فيض قدره $N\Phi$ ويؤدى تشابك الفيض المنتج بدوره الى توليد ق.د.ك فى الملف ذاته طبقا لقانون فاراداى. ونظرا لان الفيض يرجع اصلا الى تيار الملف فإن ق.د.ك المحتثة فيه تتناسب مع معدل تغير التيار (اى معدل تغير الفيض) حيث يسمى ثابت التناسب بالمحاثة L ويقاس بالهنرى (H). وعليه تكون ق.د.ك المتولدة:

$$e = -\,L.di/dt \qquad (1.18)$$

ونظرا لان هذه ال ق.د.ك محتثة فى الملف ذاتيا فإن المحاثة السابقة تسمى بالمحاثة الذاتية ويتضح من المعادلة (1.18) ان اتجاه ق.د.ك المحتثة ذاتيا يعاكس اتجاه تغير المجال وبالتالى يعاكس اتجاه تغير تيار الملف ولهذا السبب تسمى بـ ق.د.ك المعاكسة او الخلفية ومن المعادلتين (1.11) و(1.18) نجد ان:

$$N\Phi = LI$$

$$L = N\Phi/I \ \ (H) \qquad (1.19)$$

ومن المعادلتين (1.6) و (1.9) نجد ان:

$$\Phi = B.A = \mu H.A$$

$$\Phi = \mu(NI/l)A = NI/S \qquad (1.20)$$

حيث تسمى S بالممانعة المغناطيسية للملف ويسمى مقلوبها بالمنافذة ومن المعادلة (1.20) تكون:

$$\Sigma = \lambda /(\mu A) \ \ (A\tau/\Omega\beta) \qquad (1.21)$$

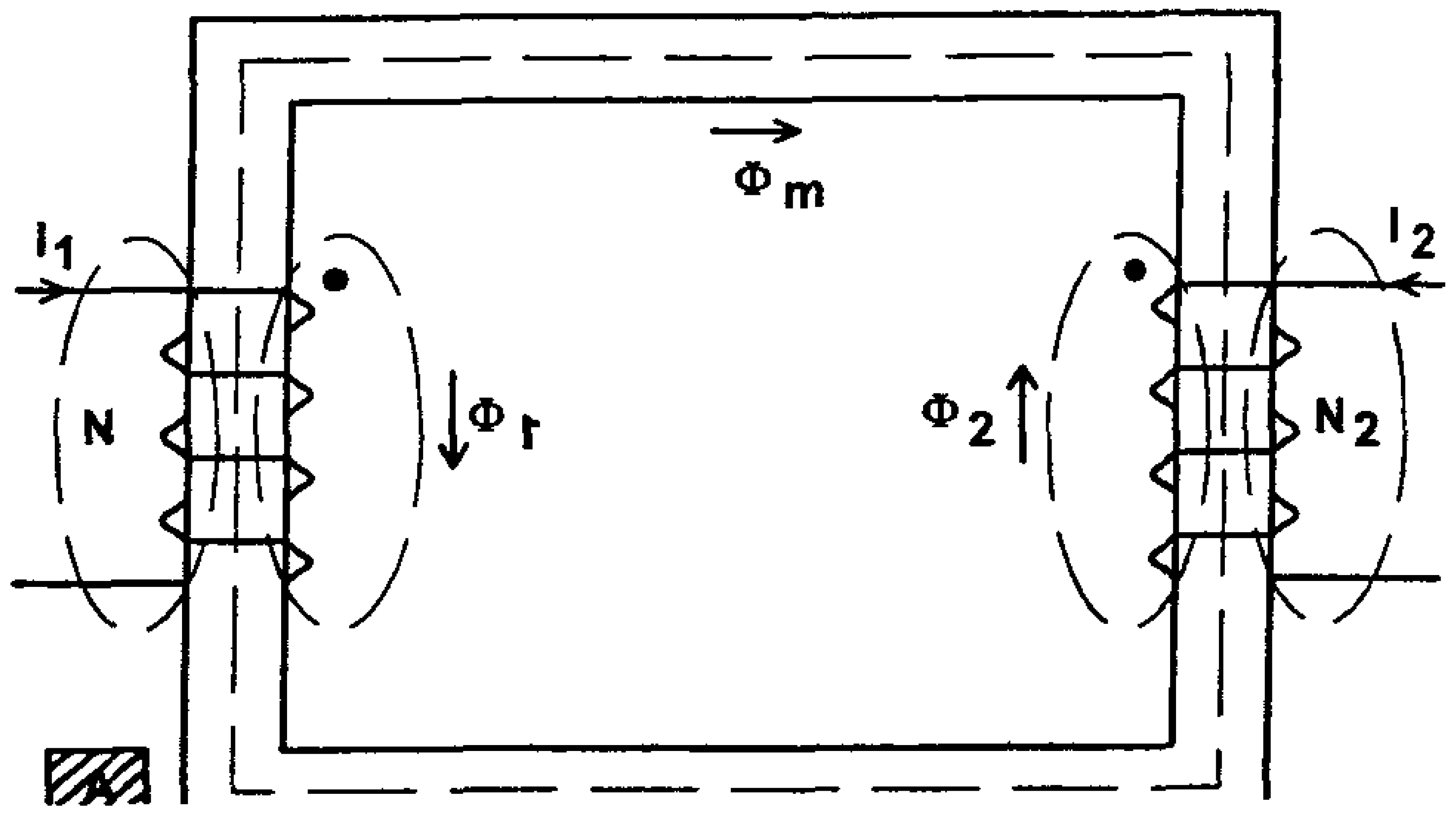
ومن المعادلتين (1.19) و (1.20) نحصل على المحاثة الذاتية كما يلى:

$$\Lambda = N2/\Sigma \qquad (1.22)$$

وبصفة عامة يمكن النظر الى ظاهرة المحاثة الذاتية للملف بأنها مقاومة التغير فى الفيض الذى يشبك الملف. وهى تشبه الى حد كبير ظاهرة القصور الذاتى حيث تقاوم الكتلة التغير فى سرعة الجسم سواء بالزيادة او بالنقصان.

9.1 - الاقتران الحثى.

اذا وضع ملفين معزولين بحيث يشبك الفيض المغناطيسى الناتج عن احدهما الملف الاخر يقال للملفين انهما مقترنين حثيا بواسطة فيض مشترك بينهما يسمى بالفيض التبادلى ويؤدى تغير التيار فى احدى الملفين الى احتثات (توليد) ق.د.م فى الملف الاخر حيث تتوقف قيمة ق.د.ك المحتثة على المحاثة التبادلية التى يرمز لها بالرمز M. وبالرجوع الى الشكل (5) نجد ان الفيض الكلى الناتج عن تيار الملف الاول ينقسم الى جزئين يكون احدهما الفيض التبادلى الذى يشبك الملفين معا والاخر الفيض المتسرب الذى يشبك الملف الاول فقط. وكذلك الامر بالنسبة للملف الثانى حيث يمكن التعبير عن الفيض الكلى للملفين كما يلى:



الشكل(5) ملفين مقترنين حثيا.

$$\Phi_{11} = \Phi_{l1} + \Phi_m \quad (1.23)$$

$$\Phi_{22} = \Phi_{l2} + \Phi_m \quad (1.24)$$

حيث يمثل Φ_{11} و Φ_{22} الفيض الكلى للملفين الاول والثانى على الترتيب ويمثل Φ_{l1} و Φ_{l2} الفيض المتسرب للملفين الاول والثانى على الترتيب ويمثل Φ_m الفيض التبادلى للملفين الاول والثانى. ومن المعادلة (1.19) نحصل على المحاثة الذاتية للملفين الاول والثانى L_{11} و L_{22} والمحاثة التبادلية لهما M كما يلى:

$$L_{11} = N_1\Phi_{11}/I_1 \quad (1.25)$$

$$L_{22} = N_2\Phi_{22}/I_2 \quad (1.26)$$

$$M = N_2\Phi_m/I_1 = N_1\Phi_m/I_2 \quad (1.27)$$

تتوقف درجة الاقتران بين الملفين على معامل الاقتران K للملفين, والذى يعرف كما يلى:

$$K = M/\sqrt{(L_{11}L_{22})} \quad (1.28)$$

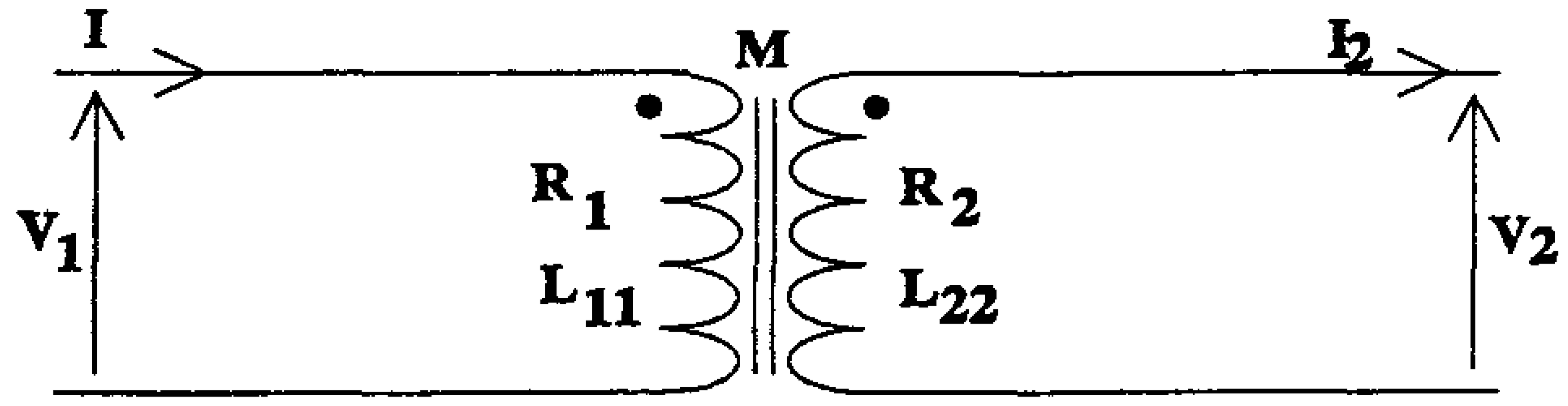
وتتراوح قيمة K بين الصفر والواحد الصحيح حيث يكون الاقتران سائبا عندما تؤول K للصفر ويكون الاقتران وثيقا عندما تؤول K للواحد الصحيح. واذا كانت مقاومة سلك الملفين R_1 و R_2 وباستخدام المعادلة (1.18) نحصل من الدائرة الكهربائية للملفين المبينة فى الشكل (5) على جهد الملفين ومن تم دائرة T المكافئة لهما والمبينة فى الشكل (6) كما يلى:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_{11} di_1/dt - Mdi_2/dt$$

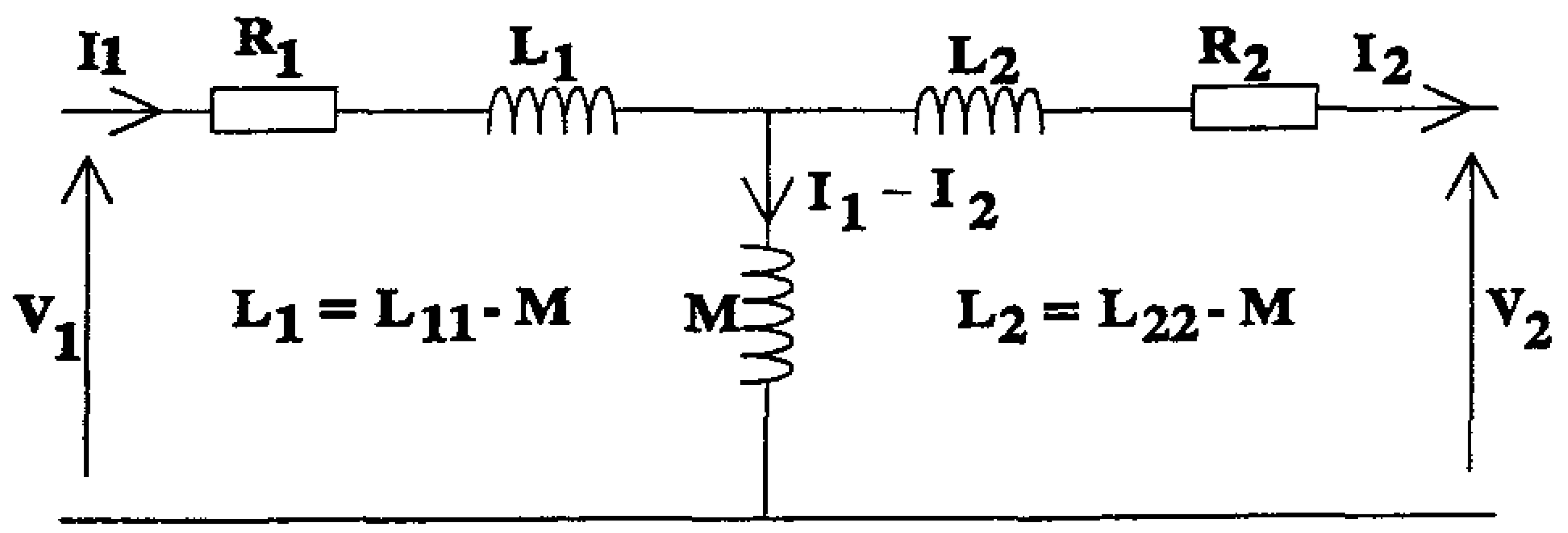
$$= R_1 i_1 + L_{11} di_1/dt + Md(i_1 - i_2)/dt \quad (1.29)$$

$$v_2 = R_2 i_2 + L_{22} di_2/dt + Mdi_1/dt$$

$$= R_2 i_2 + L_{22} di_2/dt - Md(i_1 - i_2)/dt \quad (1.30)$$



Inductively coupled coils



T-equivalent circuit

الشكل (6)الدائرة المكافئة لملفين مقترنين حثيا.

اذا اوصل ملفين مقترنين حثيا على التوالى فإن المحاثة المكافئة لهما تتوقف على كيفية لف احدهما بالنسبة للاخر. ويعتمد اتجاه الفيض الذى يشبك احد الملفين نتيجة لتيار الملف الثانى على هيئة لف الملف الثانى بالنسبة للاول بحيث ان فيض الملف الثانى اما ان يضاف الى او يطرح من فيض الملف الاول. وفى اصطلاحات الهندسة الكهربائية تستخدم علامة النقطة لبيان قطبية الملفات المقترنة بالنسبة لبعضها البعض كما فى الشكل (6). فاذا

وصل الملفين بحيث ادى اتجاه التيار فى كل منهما الى اتحاد اتجاه الفيضين الناتجين فى كل منهما يقال للملفين انهما موصلين على التوالى فى اتجاه تعاضدى او جمعى ويتحقق ذلك اذ كان التيار يدخل الى او يخرج من كلا الملفين من الطرف المنقوط حيث يمكننا فى هذه الحالة الحصول على الجهد الكلى V والمحاثة الكلية L باعادة كتابة المعادلتين (1.29) و (1.30) مع ملاحظة ان $I_1 = -I_2 = I$ وذلك كما يلى:

$$v_1 = R_1 i + L_{11} di/dt + M di/dt, \quad v_2 = R_2 i + L_{22} di/dt + M di/dt$$

$$V = v_1 + v_2 = (R_1+R_2)i + L di/dt, \quad L = L_{11}+L_{22}+2M \quad (1.31)$$

اما اذا اوصل الملفين بحيث ادى اتجاه التيار فيهما الى تعاكس اتجاه الفيضين الناتجين فى كل منهما يقال للملفين انهما موصلين على التوالى فى اتجاه تعاكسى او طرحى ويتحقق ذلك اذ كان التيار يدخل الى احد الملفين من طرفه المنقوط ويخرج من الملف الاخر من طرفه المنقوط حيث يمكننا فى هذه الحالة اعادة كتابة المعادلتين (1.29) و (1.30) مع ملاحظة ان $I_1 = I_2 = I$ لنجد ان:

$$v_1 = R_1 i + L_{11} di/dt - M di/dt, \quad v_2 = -R_2 i - L_{22} di/dt + M di/dt$$

$$V = v_1 - v_2 = (R_1+R_2)i + L di/dt, \quad L = L_{11}+L_{22}-2M \quad (1.32)$$

10.1 - الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسى.

يتطلب انشاء مجال مغناطيسى من ملف كهريائى اى مفاعل سحب كمية من الطاقة الكهربائية من المفاعل تتحول الى طاقة مختزنة داخل المجال المغناطيسى. وتتشابه هذه الطاقة مع الطاقة اللازمة لرفع كتلة فوق الارض حيث تتحول تلك الطاقة الى طاقة وضع مختزنة فى وزن الكتلة. واذا

كانت محاثة المفاعل L تابثة وكان تيار الملف i والجهد بين طرفيه e يمكن حساب الطاقة اللحظية المختزنة فى المجال المغناطيسى dW والمسحوبة خلال فترة dt كما يلى:

$$dW = e.i.dt \tag{1.33}$$

واذا استغرق انشاء المجال المغناطيسى فترة زمنية كلية قدرها t يمكن حساب الطاقة الكلية المختزنة فيه W كما يلى:

$$W = \int_0^t dw = \int_0^t e.i.dt \tag{1.34}$$

وحيث ان $e = Ldi/dt$ نجد عند تغير i من 0 الى I ان:

$$W = \int_0^t L(di/dt)i\,dt = \int_0^I Li\,di \tag{1.35}$$

$$W = \tfrac{1}{2} LI^2 \tag{1.36}$$

وبالتعويض عن L و NI من المعادلتين (1.19) و (1.9) فى (1.36) ثم التعويض عن H من المعادلة (1.6) يمكن حساب الطاقة المختزنة لكل وحدة حجم كما يلى:

$$\begin{aligned} W &= \tfrac{1}{2} (N\Phi/I)I^2 = \tfrac{1}{2} \Phi NI = \tfrac{1}{2} \Phi Hl \ \ (J) \\ &= \tfrac{1}{2} BHAl = \tfrac{1}{2} (B^2/\mu)Al \ \ (J) \\ &= \tfrac{1}{2} B^2/\mu \ \ (J/m^3) \end{aligned} \tag{1.37}$$

$$W = \tfrac{1}{2} L_{11}I_1^2 + \tfrac{1}{2} L_{22}I_2^2 \pm MI_1I_2 \tag{1.38}$$

حيث تكون اشارة الكمية الاخيرة فى المعادلة (1.38) موجبة اذا كان تأثير اتجاه التيار فى الملفين تعاضدى او جمعى وتكون الاشارة سالبة اذا كان تأثير اتجاه التيار فى الملفين تعاكسى او طرحى.

11.1 – دوائر التيار المتردد.

يتطلب انشاء مجال مغناطيسى من ملف كهربائى اى مفاعل سحب كمية من الطاقة الكهربائية من المفاعل تتحول الى طاقة مختزنة داخل المجال المغناطيسى. وتتشابه هذه الطاقة مع الطاقة اللازمة لرفع كتلة فوق الارض حيث تتحول تلك الطاقة الى طاقة وضع مختزنة فى وزن الكتلة. واذا كانت محاثة المفاعل L ثابتة وكان تيار الملف i والجهد بين طرفيه e يمكن حساب الطاقة اللحظية المختزنة فى المجال المغناطيسى dW والمسحوبة خلال فترة dt .

12-1 الامثلة المحلولة:

1 - موصل يحمل تيار A 800 موضوع فى مجال مغناطيسى كثافة فيضه T 0.5. فإذا كان الموصل يصنع زاوية 30^{o} مع خطوط الفيض، احسب القوة المؤثرة على الموصل لكل متر. (200 N/m).

الحل:

I=800A ,B=0.5T ,θ=30

$f = B.I.l.\sin\theta$

f=0.5*800*Sin(30)=200 N/m

2- موصل طوله 50 cm يقطع عمودياً فيض مغناطيسى كثافته 0.4 T وتولد فيه جهد V 2. فإذا كانت مقاومة دائرة الموصل Ω 0.5، احسب سرعة الموصل والقوة المؤثرة عليه والشغل المبذول بعد قطع 60 cm. (10 m/s, 0.8 N, 0.48 J)

الحل :

l =0.5 m , B=0.4 T , e=2V ,R=0.5Ω ,d=0.6 m

e=B l v→ v=e/B l =2/(0.4*0.5)=10 m/s

$F=b\,l\,I = B\,l\,(e/R) =0.4*0.5*(2/0.5)= 0.8$ N

$W=F.d =0.8*0.6 =0.48$ J

3– ملف حلقى (toroid) ذو 1000 لفة ولب خشبي متوسط قطره 12 cm وقطر مقطعه 2 cm. احسب تيار الملف لإنشاء فيض 0.2 mWb فى اللب. كذلك احسب التيار عند استخدام لب حديدي نفاذيته النسبية 2000. (191 A, 95.5A)

الحل:

$H=NI/l$, $l=2\pi R$, $B=\mu H=\mu NI/l=\mu NI/2\pi R$, $\phi=BA$
$A=\pi r^2$

$\phi=\mu NIA/2\pi R$ ⇒ $I= 2\pi R\phi/\mu NIA$

$\mu=\mu_o$

$I=0.2*10^{-3}$
$(2\pi*6*10^{-2})/4\pi*10^{-7}*1000(\pi*(1*10^{-2})^2=191$ A

$\mu=\mu_o\mu_r$ قيمة التيار عند أستخدام لب حديدى نفاذيته النسبية 2000 تكون قيمة

$I= 2\pi R\phi/\mu NIA$

$I=0.2*10^{-3}$
$(2\pi*6*10^{-2})/(4\pi*10^{-7}*2000*1000(\pi*(1*10^{-2})^2)=95.5$mA

4- قضيبان متوازيان طوليهما 5 m والمسافة بينهما 30 cm ويحملان تيار 500 A، احسب مقدار القوة بينهما. وإذا حدث قصر فى الدائرة ادى الى رفع تيار القضيبين الى 50 KA احسب مقدار القوة فى هذه الحالة. (0.833 N, 8.33 KN)

5– احسب فقد التخلف لعينة حديد مساحة دارة تخلفها $9.3\ cm^2$ ومقياس رسمها 1 cm=1 KAt/m=0.2 T عند تردد 50 Hz وكثافة فيض

1.5 T ومعامل ستاينمتز 2 ثم احسب الفقد لتردد 30 Hz وكثافة 1.2 T. (93 KW/m^3, 35.7 KW/m^3)

6 - ملف طولى (solenoid) يتكون من 100 لفة ملفوفة حول لب من مادة غير مغناطيسية طوله 20 cm وقطر مقطعه الدائرى 2 cm. احسب الفيض الكلى الناشئ فى اللب عند تدفق تيار 2 A فى الملف. (0.395 µWb)

7 – ملف ذو 800 لفة ولب حلقى محيطه 60 cm وأبعاد مقطعه 40×50 mm به ثغرة 5 mm. فإذا كان معامل الرص 0.92 ومعامل التسرب 1.2، احسب المساحة الفعالة للثغرة وتيار الملف لإنشاء فيض 2.5 mWb فى الثغرة. (2475 mm^3, 8A)

8 - لب صلب مسبوك مستطيل ابعاده 18×12 cm به ساق وسطى يفصلها عن احد الفكين ثغرة 1 mm ومساحة مقطع الساقين الجانبيتين والفكين 5 cm^2 ومساحة مقطع الساق الوسطى 8 cm^2 به ملف ذو 500 لفة على الساق الوسطى. اهمل تأثير التهدب والتسرب واحسب تيار الملف ليكون فيض الثغرة 1.3 mWb. (4.84 A)

9 - لب ابعاده 80×100 cm به ساق وسطى بمنتصفها ثغرة 1 mm، ابعاد مقطع ساقيه الجانبيين وفكيه 20×20 cm وأبعاد مقطع الوسطى 40×20 cm وعلى كل ساق خارجية ملف ذو 500 لفة. احسب التيار اللازم لإنتاج فيض ثغرة 100 mWb .حيث احداثيات منحنى H-B:

B (T)	0.0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
H (At/m)	0.0	35	70	110	200	500	3000

(4.65 A)

10- لب يضم قطعتي U متقابلتين ابعاد مقطع كل منها 8×5 cm تفصل نهايتهما ثغرة 1 mm الاولى من شرائح الصلب وطولها 80 cm وعليها ملف 1000 لفة والثانية من صلب مسبوك طولها 30 cm. احسب التيار اللازم لإنتاج فيض ثغرة 4 mWb.

حيث احداثيات منحنى B-H:

	B (T)	0.6	0.8	1.0	1.2
شرائح الصلب	H (At/m)	80	90	200	400
صلب المسبوك		400	500	670	990

(1.95 A)

11- احسب محاثة ملف ذو 200 لفة ولب حلقي حديدي متوسط محيطه 40 cm ومساحة مقطعه 5 cm^2 ونفاذيته النسبية 2000 يسحب تيار مغنطة 1 A. كذلك احسب المحاثة اذا كانت الحلقة مصنوعة من مادة غير مغناطيسية. (126 mH, 63 μH)

12- اثبت ان محاثة ملف حلقي عدد لفاته N ومحيط لبه l ومساحة مقطعه A ونفاذيته μ تعطى بالعلاقة $L=\mu N^2 A/l$. وإذا وجد عند صنع ملف ذو 1000 لفة ملفوفة حول لب حلقي خشبي لتغطيه بالكامل ان محاثة الملف 100 mH، احسب محاثة ملف يستخدم لب بنفس الابعاد ولكنه مصنوع من حديد نفاذيته النسبية 400 وعدد لفاته 500 لفة.
(10 H)

13- ملف حلقي ذو 119 لفة ولب حلقي حديدي متوسط محيطه 50 cm ومساحة مقطعه 2 cm^2 بها ثغرة هوائية طولها 1mm. فإذا كانت النفاذية النسبية لحديد اللب 300 وكان تيار الملف 2 A، احسب قوة الشد بين وجهي الثغرة. (1.02 N)

14- ثم قياس معاوقات ملفين مقترنين حثيا يعملان في منظومة اتصالات ترددها 1592 Hz فكانت معاوقة الملف الاول عند فتح الثاني

Ω 34+j413 ومعاوقـة الثـانى عنـد فـتح الاول Ω 40.8+j334
والمعاوقـة الـكليـة عنـد وصـل الملفـين علـى التوالى فـى قطبيـة جمعيـة
Ω 74.8+j1109. احسب محاثات الملفين ومعامل الاقتران بينهما.
(33.4 mH, 18.1 mH, 0.49)

15- ثم قياس معاوقات ملفين مقترنين حثيا معامل اقترانهما 0.6 يعملان في منظومة اتصالات ترددها 1250 Hz فكانت معاوقة الملف الاول عند فتح الثانى Ω 50+j785.4 ومعاوقة الثانى عند فتح الاول Ω 40+j196.35. احسب المعاوقة الكلية للملفين عند وصلهما على التوالى مرة فى قطبية جمعية وأخرى فى قطبية طرحية. (90+j1453 Ω, 90+j510.5 Ω)

الفصل الثاني

المحولات الكهربائية

2- المحولات الكهربائية

1.2- مقدمة:

بالرغم من كون المحول آلة ساكنة فهو يعد عنصر لاغنى عنه في انظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة والانظمة الكهربائية ذات التيار المتناوب لقدرته على تحويل الطاقة الكهربائية بكفاءة عالية من دائرة كهربائية بجهد وتيار محددين الى دائرة اخرى بجهد وتيار مختلفين وبذات التردد. وبذلك يعد المحول احد العوامل الرئيسية وراء اعتماد التيار المتناوب في منظومات القوى الكهربائية. **ويمكن بصفة عامة تصنيف المحولات تبعاً لمجالات استخدامها الى ثلاثة اصناف هي:**

1 - محولات القوى: وهي تستخدم لتحويل مستويات الجهد بين اجزاء منظومات القوى حيث تتطلب العوامل الاقتصادية والفنية توليد القدرة بجهود 11-28 KV ونقلها لمسافات طويلة بجهود 110-1000 KV وتوزيعها على مراكز الاحمال بجهود 11-66 KV ليتم استهلاكها عبر المغذيات بجهود 110-440 V. ولايمكن التوفيق بين هذه الجهود بدون محول القوى.

2 - محولات الاجهزة: وهي تستخدم في منظومات القياس والتحكم لخفض الجهود والتيارات العالية الى مستويات يسهل قياسها ومراقبتها بواسطة اجهزة القياس والمراقبة والتحكم الصغيرة والحساسة مثل مرحلات الحماية. وقد تستخدم هذه المحولات لترشيح مركبات التيار المستمر وعزل الاجهزة الحساسة من موجات الجهود المرتفعة العابرة وغيرها من الاضطرابات.

3 - محولات التردد العالي: وهي تستخدم في منظومات الاتصالات والدوائر الالكترونية متغيرة التردد. والى جانب تحويل الجهد تستخدم هذه المحولات في موائمة المعاوقة بين المصدر والحمولة بما يحقق التدفق

الاعظم للقدرة في دوائر التضخيم ويحقق اكبر معاملات الكسب في هذه الدوائر. كما تستخدم هذه المحولات في عزل الاتصال المباشر بين بعض اجزاء منظومة الاتصالات.

وسيتم التركيز في هذا الفصل على دراسة محولات القوى ومحولات الاجهزة كمدخل لدراسة خصائص الدوائر المغناطيسية في معدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة. ومن المفيد ملاحظة التناظر بين عمل المحولات وبعض النظم الميكانيكية مثل الرافعات والتروس والتي يمكن محاكات عملها باستخدام النماذج الرياضية للمحول.

ويتكون المحول اساساً من دائرتين كهربائيتين (او اكثر) معزولة كهربائياً ومقترنة مغناطيسياً بواسطة دائرة مغناطيسية مشتركة حيث يضم المحول في ابسط صوره ملفين ملفوفين على لب حديدي مشترك ويكوّن كل منهما دائرة كهربائية مستقلة. ويتم تشغيل المحول بتوصيل احد ملفاته بمصدر تغذية تيار متناوب ويسمى هذا الملف بالملف الابتدائي، وتوصل الحمولة بالملف الاخر ويسمى بالملف الثانوي. وقد يشار الى الملفين بدلالة جهدهما فيسمى الملف الاعلى جهداً بملف الجهد العالي (HV) ويسمى الملف الاقل جهدا بملف الجهد المنخفض (LV).

وتقوم نظرية عمل المحولات اساساً على ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي المتمثلة في تأثير الحث المتبادل بين الملفات المقترنة مغناطيسياً حيث يتشابك الفيض المغناطيسي الناشيء عن مرور التيار المتناوب في الملف الابتدائي مع الملف الثانوي فيولد فيه ق.د.ك (قوة دافعةكهربية) تغذي الحمولة الكهربائية المتصلة بالملف الثانوي. وتتم عملية نقل القدرة الكهربائية بين الملفين الابتدائي والثانوي بواسطة المجال المغناطيسي المتمثل في الفيض المتبادل الذي يشبك الملفين معا حيث تتوقف كفاءة نقل القدرة على معامل الاقتران بين الملفين لتصل الكفاءة قمتها عندما يكون الاقتران

وثيقاً وتاماً، وتكون القدرة المنقولة صفراً عندما يكون الاقتران سائباً او لا وجود له.

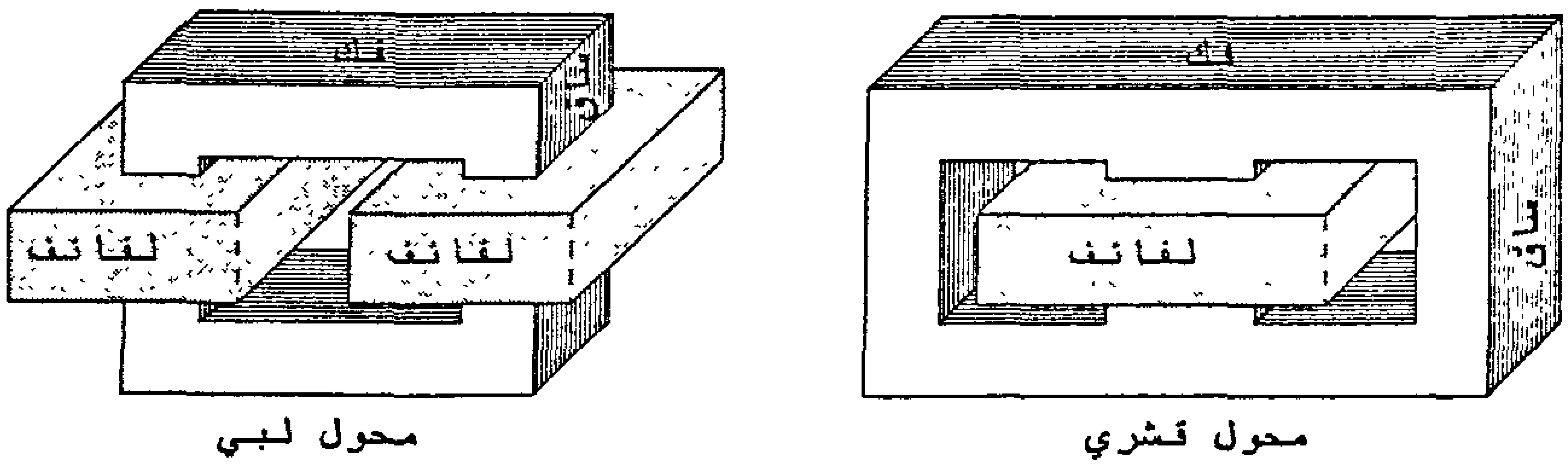
ويجدر بالذكر ان تردد تيار دائرة الملف الثانوي يكون دائماً مساوياً لتردد التيار في الملف الابتدائي، بينما غالباً ما يصحب عملية نقل القدرة بين الملفين رفع او خفض للجهد مع ملاحظة انه عادةً ما يتم تصميم المحول ليكون الجهد المحتث (المتولد) لكل لفة متساوياً في الملفين الابتدائي والثانوي. ويتم التحويل بين مستويات الجهد المختلفة في الملفات بضبط النسبة بين عدد لفاتها عند القدر المطلوب، مع ملاحظة امكانية استخدام نفس المحول لرفع اوخفض مستويات التيار ولكن ذلك يتم بنسبة معاكسة لنسبة رفع او خفض مستويات الجهد.

وللحصول على اعلى كفاءة تلف الملفات على لب من مادة فيرومغناطيسية ذات ممانعة صغيرة لتركيز خطوط الفيض في المسار الحديدي وتقليل الفيض المتسرب عبر الهواء، مع ملاحظة ان الممانعة تعتمد على مدى تشبع مادة اللب بالفيض المغناطيسي. ويسمى هذا النوع من المحولات بالمحولات ذات اللب الحديدي ومن اشهرها محولات القوى. ويكمن العيب الرئيسي للب الحديدي في الفقد الناتج عن تعرضة لمجال مغناطيسي متناوب والمتمثل في فقد التخلف المغناطيسي وفقد التيار الدوامي.

2.2 - بنية محول القوى.

تصنع محولات القوى في نوعين يختلفان في بنية اللب الحديدي هما النوع ذو اللب والنوع ذو القشرة وكما في الشكل (1). وفي النوع الاول المعروف اختصاراً بالمحول اللبي تبدو اللفائف محيطةً باللب المستطيل وتوضع الملفات على ضلعين متقابلين يعرفان بالساقين يربطهما الضلعين الآخرين المعروفين بالفكين. وفي النوع الثاني المعروف اختصاراً بالمحول القشري يبدو اللب محيطاً باللفائف وهو يصنع على هيئة مستطيل به ساق عرضية في

منتصفه تلف عليها اللفائف لتحمى بالساقين الخارجين ويكتمل اللب بالفكين، وعادةً ما تكون مساحة مقطع الساق الوسطى ضعف مساحة الساق الخارجية.

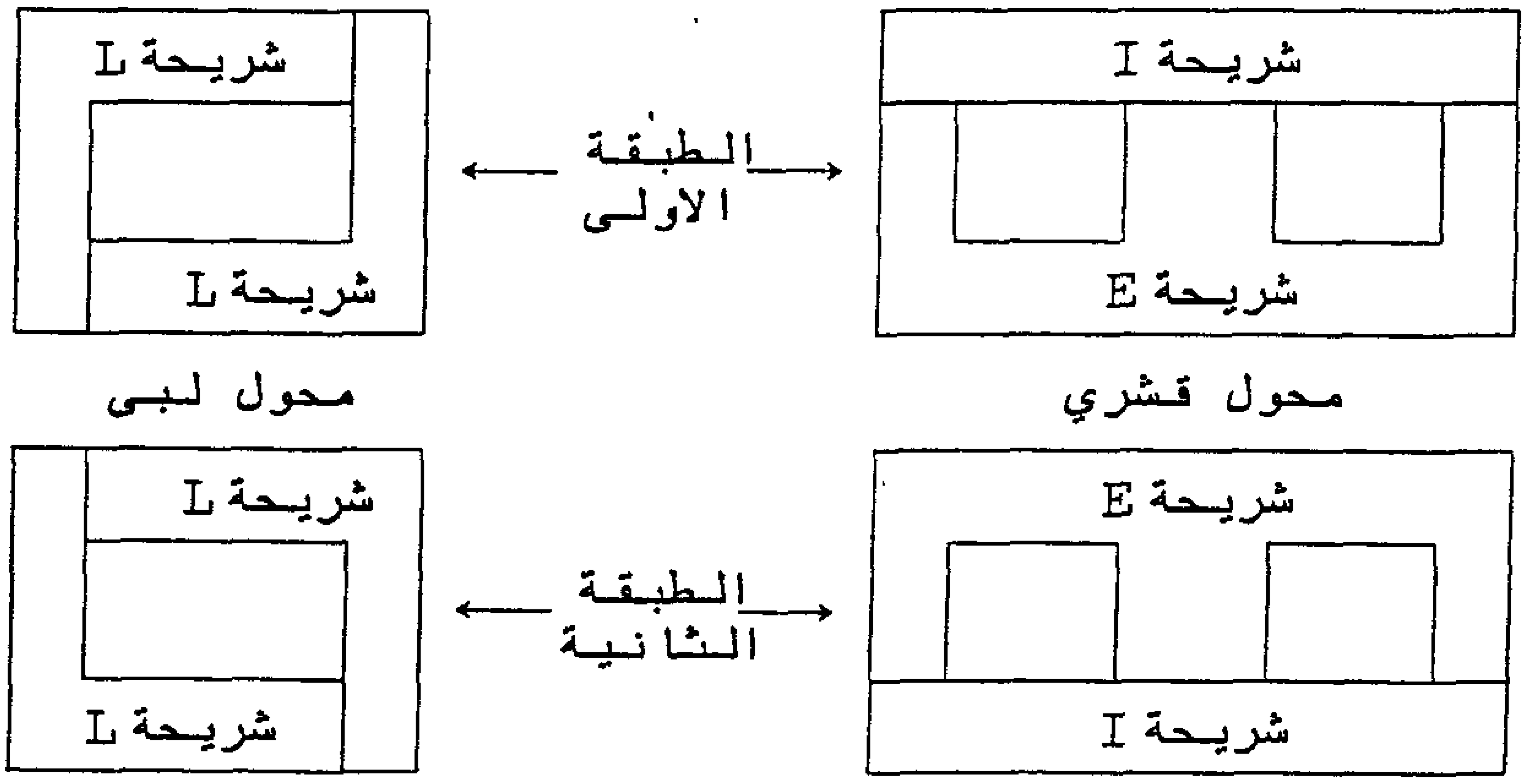


الشكل (1) بنية محولات القوى بنوعيها.

ويختلف نوعي المحول في بعض الخواص الميكانيكية والقوى المغناطيسية المؤثرة على الملفات كما يلاحظ وجود مسارين للفيض في النوع القشري مقارنةً بمسار واحد في النوع اللبي. وفي كلا النوعين يصنع اللب الحديدي من شرائح لايزيد سمكها عن 0.35-0.5 mm تعزل عن بعضها البعض بطبقة من الورنيش للتقليل من فقد التيار الدوامي. ويختلف النوعان في كيفية تصنيع وتجميع هذه الشرائح حيث تصنع الشرائح على شكل حرف L في المحول اللبي وشكل حرف E في المحول القشري.

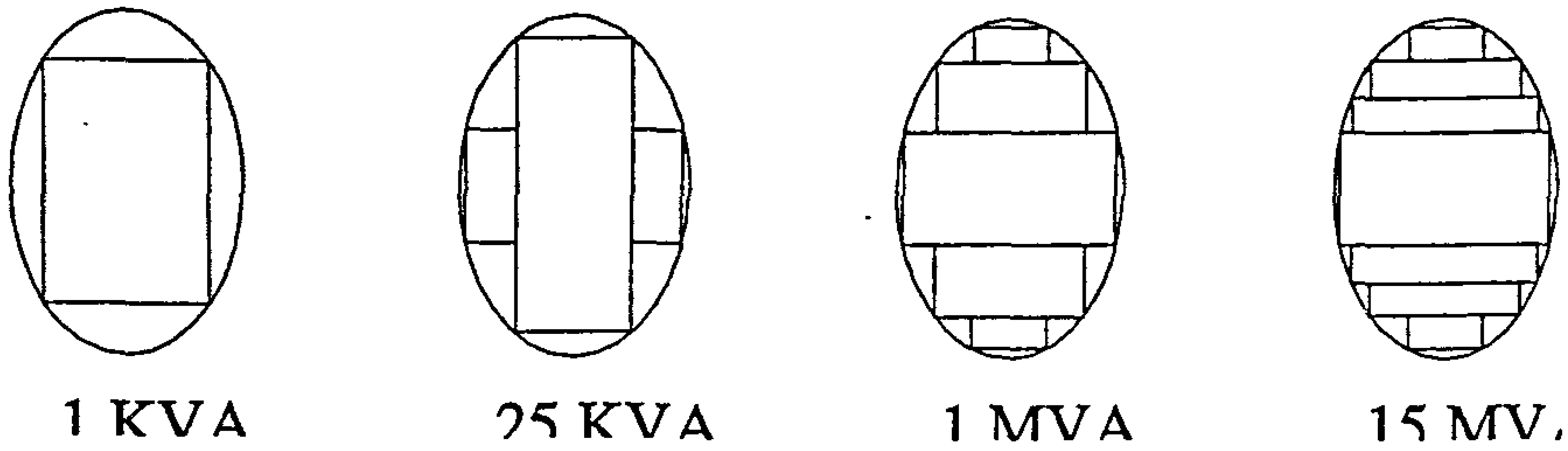
وعادةً ما تصنع الشرائح من سبائك من الحديد والسليكون تمتاز برخص ثمنها وارتفاع نفاذيتها المغناطيسية ومقاوميتها الكهربية مما يقلل من كل من فقودات التخلف المغناطيسي والتيار الدوامي. وتجمع الشرائح وترص بالتبادل بحيث تتشابك اطرافها لزيادة تماسكها ولمنع وجود تغرة هوائية متصله مما يقلل من ممانعة اللب كما في الشكل (2). ويمكن تحسين الخصائص المغناطيسية للب بمعالجته حرارياً، ويكمن عيبه الرئيسي في التركيبة البلورية لسبائكه. وقد يصنع اللب من شرائط فولادية تفوق في خصائصها الشرائح العادية ويتم الحصول عليها بصهر سبيكة الحديد وتبريدها فجأة.

وتحزم الشرائح بقوة لمنع الطنين والاهتزازات الناشئة عن القوى المغناطيسية وذلك باستخدام مسامير وصواميل قوية للحصول على الضغط المطلوب لمنع الطنين وتعزل عن حديد المحول للحد من فقد التيار الدوامي. ويجب ملاحظة ان قوة تماسك شرائح اللب تكتسب اهمية كبرى في محولات القوى الكبيرة لما تتعرض له بنية اللب من قوى ميكانيكية ضخمة، خصوصاً في حالات القصر. وقد تصنع في شرائح لب هذه المحولات ثقوب لتكوّن قنوات تبريد عمودية على الشرائح.



الشكل (2) ترتيب شرائح اللب المتعاقبة.

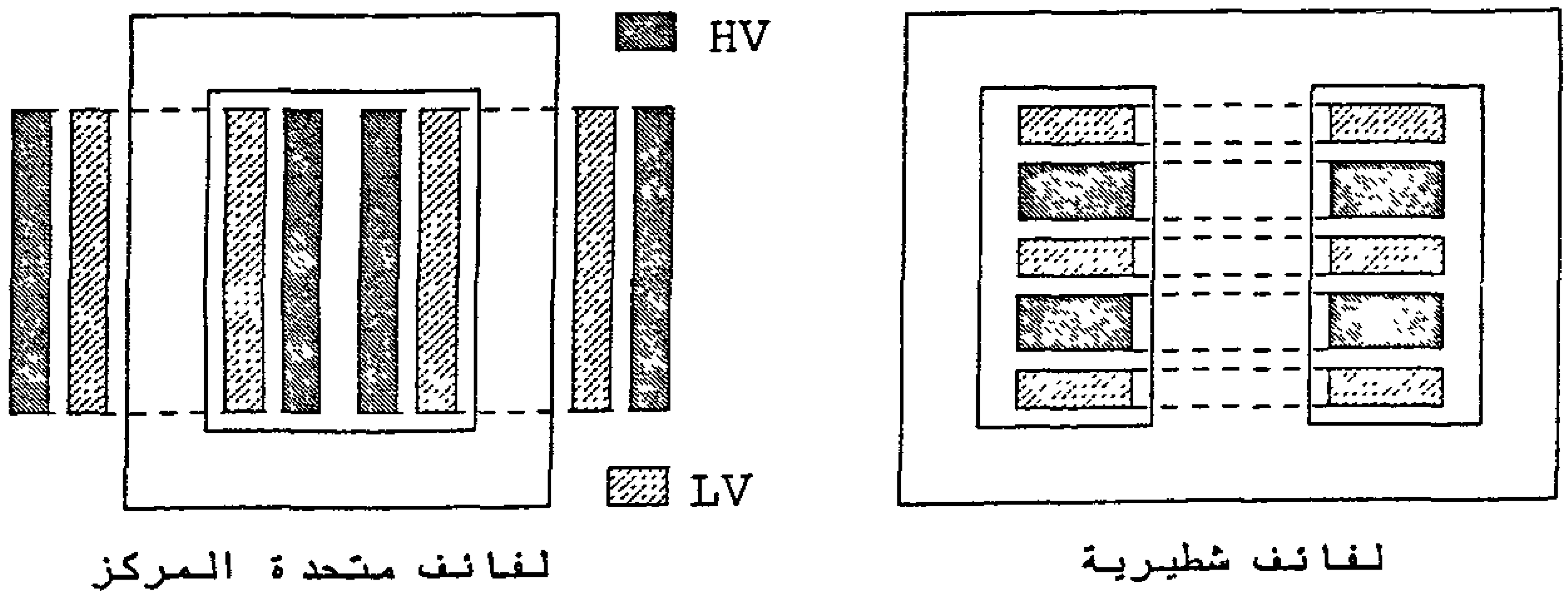
وبينما يعتبر المقطع المربع او المستطيل لسيقان اللب مقبولاً في المحولات الصغيرة، فإن سيقان لب المحولات الكبيرة يفضّل ان تكون ذات مقطع شبه دائري وذلك بجعل مقطع اللب متدرج يضم عدد من التدرجات يمكن الحصول عليها بتقليل سمك وعرض اطار الشرائح البعيدة عن المركز وكما في الشكل (3). واضافة الى اللب الحديدي تضم بنية محول القوى اللفائف الملفوفة حول سيقان اللب ووعاء الزيت الذي يملاء بزيت المحول ويوضع فيه مجموع اللب واللفائف. وتكتمل بنية المحول بالعوازل والجلبات واطراف التوصيل ومعدات التحكم والحماية الملحقة بالمحول.



الشكل (3) مقطع لب محولات القوى.

1.2.2 - لفائف المحول.

لايوجد فارق يذكر بين الخواص الكهربائية بين النوعين اللبي والقشري لمحول القوى، ولكنهما يختلفان في كيفية ترتيب الملفات وتوزيعها على السيقان. وعادةً ما يتم ترتيب اللفائف في المحول اللبي على هيئة اسطوانات توزع على كلا الساقين وتسمى اللفائف في هذه الحالة باللفائف متحدة المركز. كما يتم ترتيب لفائف المحول القشري في الغالب على هيئة اقراص تصف فوق بعضها البعض على الساق الوسطى وتسمى اللفائف في هذه الحالة باللفائف الشطيرية. ويبين الشكل (4) مقطع عرضي في لمجموع اللب واللفائف يوضح ترتيب اللفائف لنوعي محول القوى.



الشكل (4) ترتيب لفائف محولات القوى.

وفي اللفائف متحدة المركز الاكثر شيوعا قد تلف الملفات حلزونياً وتترك فراغات اسطوانية بين اسطوانات اللفائف بواسطة فواصل محورية عازلة حيث تستخدم هذه الفراغات كقنوات للتبريد. وتسمى اللفائف في هذه الحالة باللفائف الحلزونية. كما قد تترك ولنفس الغرض فراغات عازلة بين طبقات اللفائف الشطيرية وتسمى اللفائف في هذه الحالة باللفائف القرصية. تصنع ملفات المحول من عدة اجزاء توضع متداخلة وملاصقة لبعضها البعض لزيادة معامل الاقتران والتقليل من تأثير الفيض المتسرب حيث تستدعي متطلبات العزل ان تكون لفائف الجهد المنخفض الاقرب الى الحديد.

والى جانب الاعتبارات الكهربائية والحرارية يجب ان تتوفر في اللفائف قوة تحمل ميكانيكية كبيرة لمواجهة الاجهادات الميكانيكية الضخمة التي تنشاء اثناء حالات القصر وقد تحطم اللفائف. ولهذه الاسباب وبغية التوفير في كمية النحاس المستخدمة في الملفات، يفضل في محولات القوى الكبيرة استخدام ملفات دائرية المقطع لما توفره من ميزات مقارنةً بالملفات ذات المقطع الرباعي.

2.2.2 – عوازل المحول.

عادةً ما يتم عزل موصلات لفائف المحول باستخدام عازل ورقي او قطني في المحولات المغمورة في الزيت، او باستخدام اشرطة زجاجية في المحولات الجافة ذات العزل الهوائي. ويكون سمك العازل اكبر عند نهايات الملفات وخصوصاً ملفات الجهد العالي لما تتعرض له من اجهادات عالية جداً مقارنةً بوسط الملفات. وتعود هذه الاجهادات الى موجات جهد التمور وغيرها من الجهود النبضية الناتجة عن عمليات الفصل/الوصل وحالات القصر. ولذلك يجب تحديد سمك العازل عند نهايات الملفات بما يتفق مع متطلبات التحكم في الاجهادات النبضية لتجنب الانهيار العازلي في المحول.

ويتم عزل اجزاء لفائف الجهد العالي ولفائف الجهد المنخفض عن بعضها البعض وعن حديد اللب باستخدام عوازل خاصة من ورق الباكلايت واغلفة الالفانتيد تصنع على هيئة اسطوانات او اقرص بحسب نوع اللفائف وموضع هذه الحواجز العازلة. ومن الجدير بالملاحظة ان السماحية النسبية للمواد المستخدمة في عزل الموصلات والفصل بين الملفات اكبر من نظيرتها لزيت المحول. ونتيجة لذلك سيتعرض الزيت لمجالات كهربائية اقوى من العوازل المكافئة في سمكها. ولذلك يجب حساب عرض مسالك الزيت بدقة لتجنب الانهيار العازل.

وبينما تستخدم القضبان النحاسية في توصيل نهايات ملفات المحول بالقضيب العمومي مباشرة في المحولات المعزولة بالهواء حيث لايوجد وعاء معدني للمحول فإن ذلك يتطلب استخدام عوازل خاصة او جلبات عازلة لاختراق وعاء الزيت في المحولات المغمورة في الزيت. وحتى جهد 33 ك.ف تستخدم لهذا الغرض عوازل البورسلين العادي، اما فوق هذا الجهد فيتم استخدام جلبات سعوية او جلبات مملؤة بالزيت توضع على قمة وعاء الزيت، وعادةً ماتكون هذه الجلبات على هيئة اسطوانات يكون قطرها اكبر عند نقطة اختراقها للجدار المعدني ويقل تدريجياً باتجاه اطرافها.

وتصنع الجلبات المملؤة بالزيت على هيئة اسطوانات مجوفة من البورسلين يمتد الموصل على طول محورها ويملأ الحيز بين الموصل والبورسلين بالزيت العازل. كما توضع حول الموصل اسطوانات ذات جدار رقيق من الباكلايت لمنع تكون سلاسل موصلة من شوائب الزيت. وتصنع الجلبات السعوية من طبقات سميكة من ورق الباكلايت على التعاقب مع رقائق القصدير لانشاء سلسلة من المتسعات بين طبقات القصدير المتعاقبة وبين الطبقة الاولى والموصل. ويمكن تغير المتسعات بتغيير المسافات بين رقائق القصدير لضبط توزيع الجهد. وتحاط الجلبة السعوية المستخدمة في العراء بغلاف من البورسلين.

3.2.2 – تبريد المحول.

بينما قد يساعد اضطراب الهواء الناتج عن الدوران في الآلات الدوارة على التخلص من الحرارة الناتجة عن تشغيل الآلة، فإن المحولات ولكونها آلات ساكنة تتطلب ترتيبات خاصة للتخلص من الحرارة المتولدة بسبب فقودات اللب واللفائف وخصوصاً في محولات القوى ذات القدرة الكبيرة. ولكن انخفاض هذه الفقودات في المحول مقارنةً بنظيراته من الآلات الكهربائية يسمح بالاكتفاء بوسائط وطرق تبريد متيسرة عملياً وذات تكلفة مقبولة. وتهدف عملية التبريد اساساً الى الحفاظ على المواد العازلة المستخدمة في المحول من الانهيار نتيجةً لتعرضها لدرجات حرارة عالية اثناء التشغيل. **وفيما يلي ملخص لاكثر الطرق والوسائل استخداماً في تبريد المحولات:**

1 - التبريد الطبيعي بالهواء ويستخدم في المحولات الصغيرة جداً حتى قدرة حوالي 10 KVA والتي تعمل عند جهود منخفضة. ويكتفى في هذه الحالة بالهواء المحيط كوسيط للتبريد.

2 - التبريد بدفع الهواء ويستخدم في المحولات حتى قدرة حوالي 1 00 KVA. وفيه تستخدم مراوح موجة بشكل مناسب لتدوير الهواء المحيط بالمحول قسرياً لزيادة كفاءة التبريد.

3 - التبريد الطبيعي بالزيت وهو الاكثر استخداماً في محولات القوى الكبيرة. وفيه يتم غمر المحول في زيت خاص لينقل الحرارة طبيعياً بالتوصيل المباشر الى جدار الوعاء ومنه الى الهواء المحيط.

4 - التبريد القسري بالزيت ويستخدم في محولات القوى الكبيرة جداً. وفيه تستخدم مضخات لتدوير الزيت لزيادة كفاءة التبريد. وقد تستخدم مراوح لنقل الحرارة بعيداً عن جدار الوعاء.

ويشترط في الزيت المستخدم في تبريد المحولات ان يكون ذو خواص كيميائية ممتازة. وعلى وجه الخصوص يجب ان يمتاز بنقائه وخفته وخلوه من الحموضة وعدم قابليتة للترسب والاشتعال. وبالاضافة الى نقل الحرارة بعيدا من اللب واللفائف الى اسطح مبادلات الحرارة، يؤدي زيت المحول وظيفتان مهمتان تتمثلان في زيادة العزل الكهربائي بين اللفائف والعمل على اخماد موجات الطنين الناتجة عن القوى المغاطيسية المؤثرة على شرائح اللب.

ويتم زيادة مساحة سطح وعاء الزيت بهدف زيادة معدل تبدد الحرارة بدون زيادة الحجم بواسطة: (أ) زعانف تلحم رأسياً على جوانب الوعاء؛ (ب) جعل سطح الوعاء متعرجاً ذو تجاعيد؛ (ج) انابيب تلحم رأسياً على جوانب الوعاء تصب فيه من طرفيها؛ (د) استخدام مشعّات (مبرّدات) خارجية في حالة التبريد القسري بالزيت.

3.2- المحول المثالي.

بغض النظر عن بنية المحول ونوعه وملفاته يجب ان يهدف تصميمه لتحقيق اربعة مطالب هي:

1 - ان تكون الملفات مقترنة مغناطيسياً بكفاءة عالية وذلك بأن يكون معامل الاقتران بينها الواحد الصحيح تقريباً. وهذ يتطلب ان يكون الفيض المتسرب من الملفين ذو قيمة مهملة.

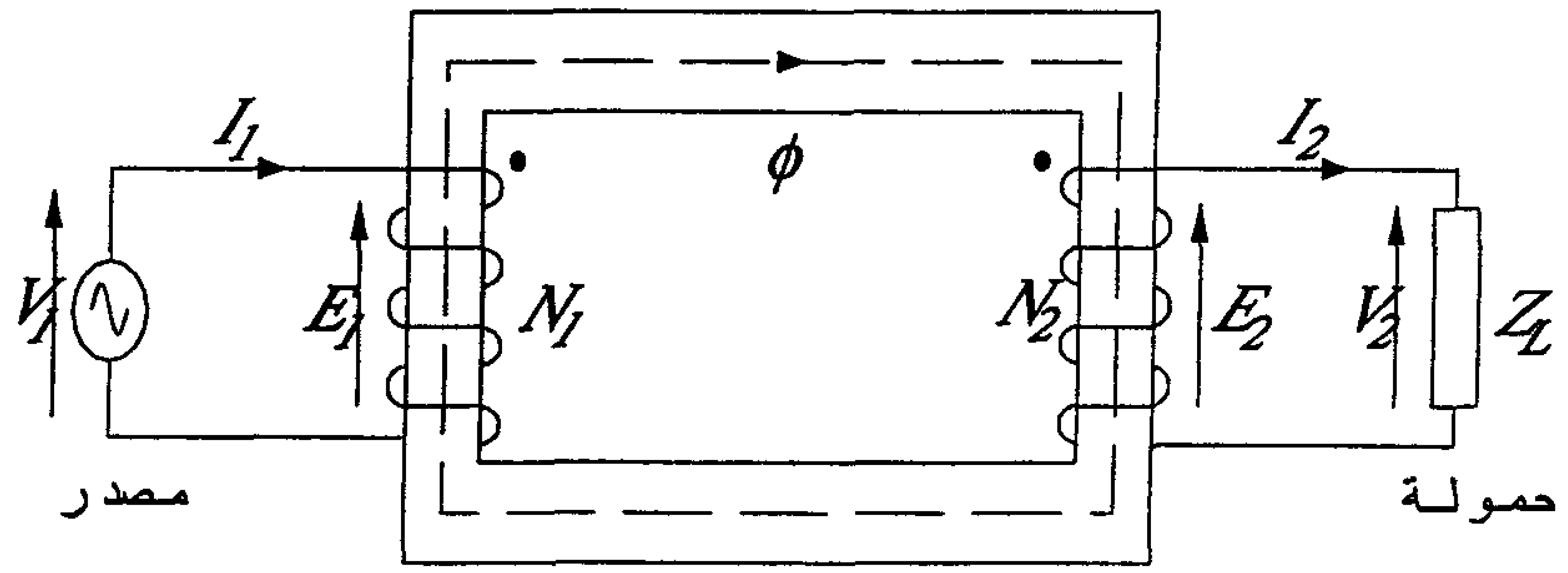
2 - ان تكون القوة الدافعة المغناطيسية (ق.د.م) اللازمة لمغنطة اللب وانشاء الفيض خلاله مهملة وذلك بأن تكون ممانعة اللب صفر تقريباً. وهذا يتطلب ان تؤول نفاذية اللب الى مالانهاية.

3 - ان يكون الفقد في الملفات واللب اقل مايمكن وذلك بأن يكون الفقد الاومي في مقاومة الملفات وفقودات التيار الدوامي والتخلف المغناطيسي في اللب الحديدي ذات قيم يمكن اهمالها.

4 - ان تكون العلاقة بين الاجهاد المغناطيسي وكثافة الفيض اللب خطية وذلك بأن تكون نفاذيته ثابتة. وهذا بدوره يتطلب ان تكون مادة اللب غير قابلة للتشبع المغناطيسي.

ويسمى المحول الذي تتحقق فيه الشروط السابقة بشكل تام بالمحول المثالي (الخالي من العيوب). ويتطلب ذلك ان يكون الاقتران بين الملفات موثوقاً وتاماً ليكون الفيض المتسرب مهملاً. وان تكون مقاومة اللفائف صفراً وممانعة اللب وموصليته صفراً لتكون فقودات المحول مهملة. ولكون ممانعة اللب صفر تكون ق.د.م ومن ثم تيار الاثارة اللازم للتغلب على ممانعة اللب وانشاء الفيض خلاله مهملاً، وبالتالي لايسحب المحول سوى التيار اللازم لتغذية الحمولة، ولن يتشبع اللب مغناطيسياً.

وبالرغم من انه لايمكن عمليا تلبية اي من المتطلبات السابقة بشكل تام فإن النموذج البسيط للمحول المثالي (الوهمي) يعطي صورة واضحة عن المحول الحقيقي الذي يمكن تمثيلة بنموذج معدل للمحول المثالي. ويبين الشكل (5) رسم تخطيطي يمثيل المحول المثالي كدائرة مغناطيسية.



الشكل (5) المحول المثالي.

1.3.2 – المحول المثالي اثناء اللاحمل.

عند فتح ملفه الثانوي وتوصيل ملفه الابتدائي بمصدر ذو جهد جيبي V_1 يسحب المحول المثالي تيار اثارة يؤول للصفر لمغنطة اللب وانشاء

فيضه ϕ. وطبقاً لقانون فرداي سيؤدي ذلك الى احتثات ق.د.ك E_1 في الابتدائي معاكسة لاتجاه تياره، و ق.د.ك E_2 في الثانوي. وبالنظر للمحول المثالي المبين في الشكل (5) والذي يضم N_1 لفة في الابتدائي و N_2 لفة في الثانوي يتضح من قانون كيرشوف الثاني ان $V_1=E_1$ وكذلك $V_2=E_2$ ويمكن التعبير عن الفيض ϕ كما يلي:

$$V_1 = V_{1max} \sin(\omega t) \tag{2.1}$$

$$E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = V_1 \tag{2.2}$$

$$N_1 \frac{d\phi}{dt} = V_{1max} \sin(\omega t) \tag{2.3}$$

$$d\phi = \frac{V_{1max}}{N_1} \sin(\omega t)\, dt \tag{2.4}$$

$$\phi = \int d\phi = -\frac{V_{1max}}{\omega N_1} \cos(\omega t) \tag{2.5}$$

$$\phi = \phi_{max} \sin(\omega t - 90°) \tag{2.6}$$

وبذلك سيكون الفيض الجيبي الناشئ في اللب متأخراً °90 عن الجهد.كما مبين بالشكل (6) ويمكن من قانون فرداي والمعادلة (2.6) التعبير عن ق.د.ك الملفين وقيمتهما الفعالة (جذر متوسط المربعات) كما يلي:

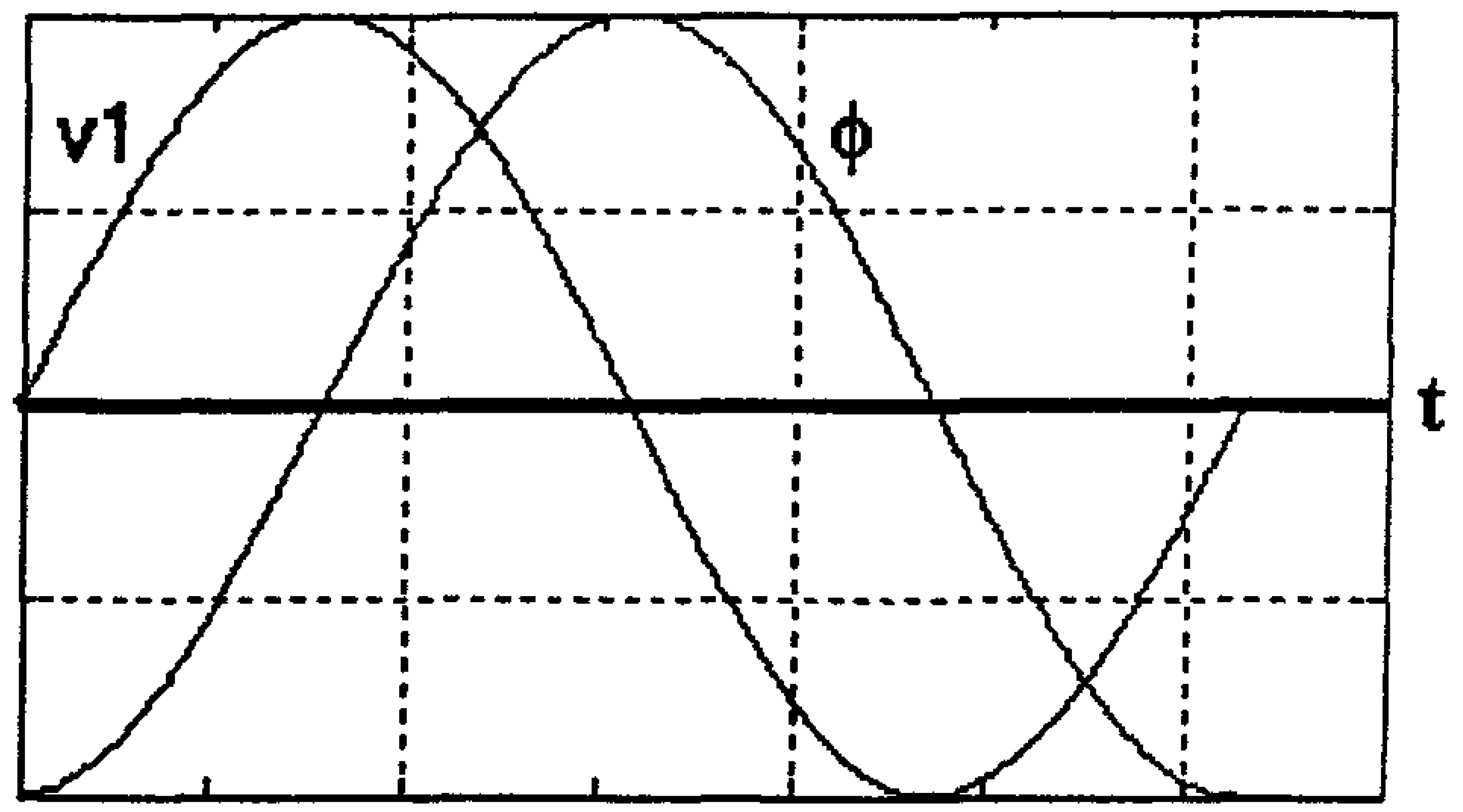
$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} = \omega \phi_{max} N_1 \cos(\omega t - 90°) = E_{1max} \sin(\omega t) \tag{2.7}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} = \omega \phi_{max} N_2 \cos(\omega t - 90°) = E_{2max} \sin(\omega t) \tag{2.8}$$

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{1max} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi_{max} N_1 = 4.443 \phi_{max} f N_1 \tag{2.9}$$

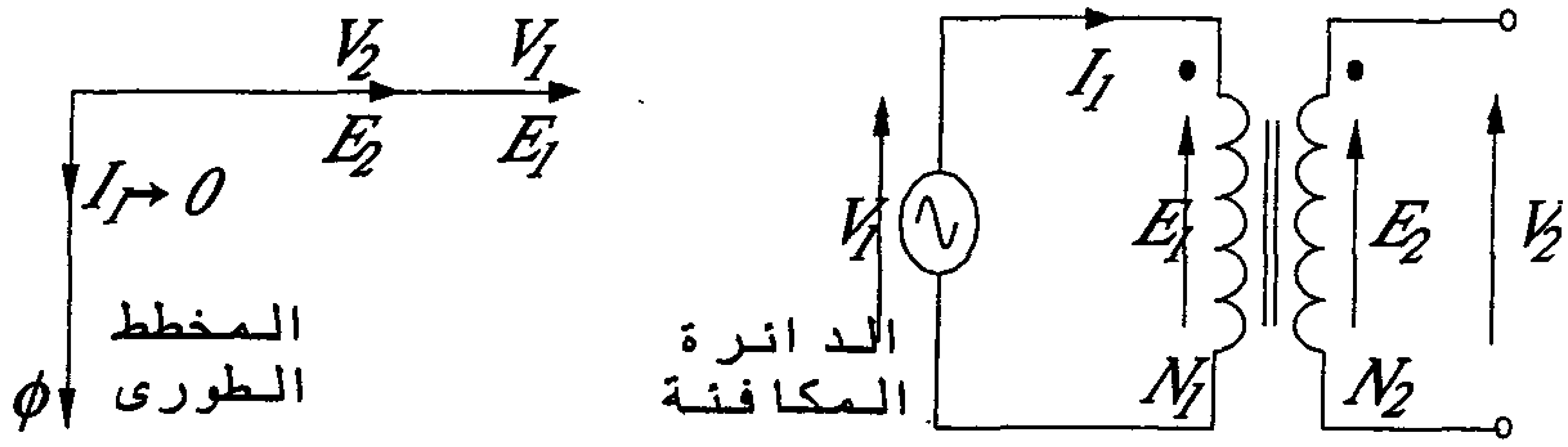
$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{2max} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi_{max} N_2 = 4.443 \phi_{max} f N_2 \tag{2.10}$$

وهكذا يتضح ان ق.د.ك المحتثة في الملفين تتناسب طردياً مع عدد لفاتهما وكل من تردد المصدر والفيض الناشئ خلال اللب. كما يتضح من المعادلات (2.6) و (2.7) و (2.8) ان متجهات ق.د.ك ملفي المحول المثالي منطبقة طورياً وكلها تتقدم 90^o عن متجه الفيض.



الشكل (6)موجة الجهد والفيض الجيبية

ووفقاً لاصطلاح الاشارات المتبع فقد تم حذف اشارة السالب من قانون فرداي في المعادلات السابقة واستعيض عنها باعتماد اتجاه ق.د.ك معاكس لاتجاه التيار وكما هو مبين في الشكل (5). وبذلك تكون ق.د.ك المحتثة في كل من ملفي المحول المثالي عند اللاحمل تتطبق طورياً مع جهد الملف وتساويه في المقدار حيث يمكن تمثيل المحول في هذه الحالة كما في الشكل (7).



الشكل (7) المحول المثالي عند اللاحمل.

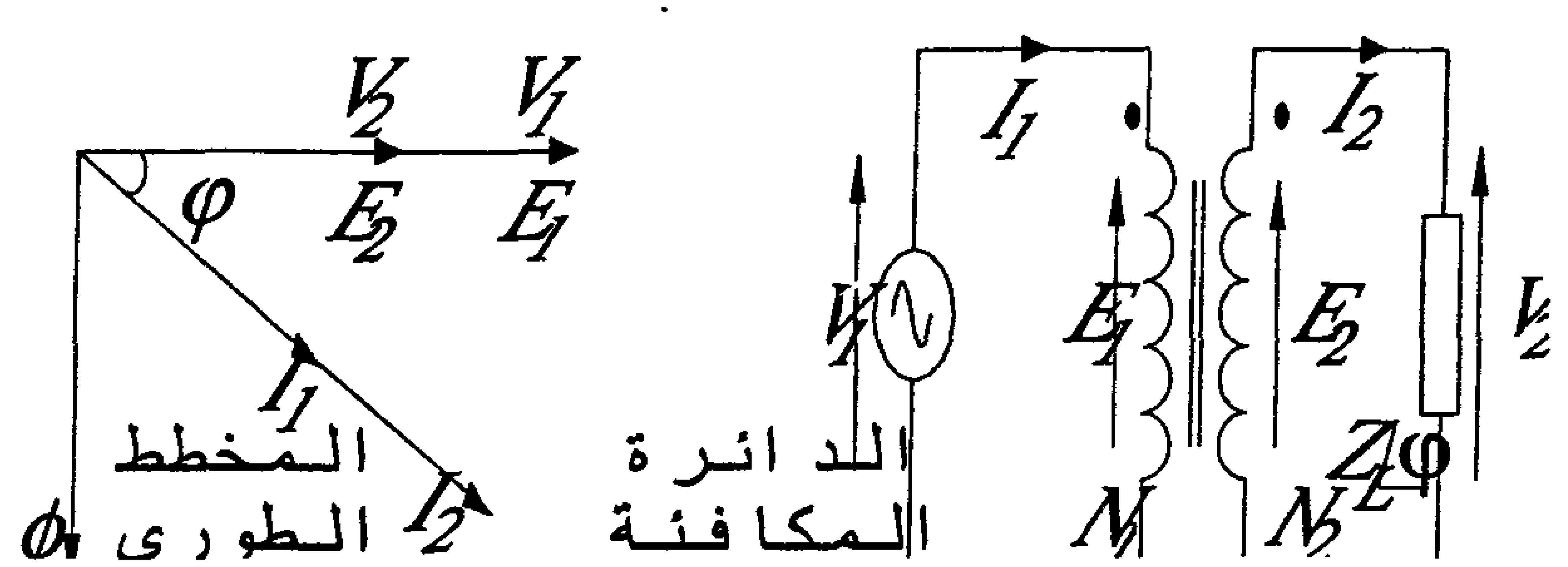
وتبين المعادلتين (2.9) و (2.10) ان النسبة بين جهد الملفين تساوي نسبة عدد لفاتهما. وهذا يمثل القاعدة الاولى لعمل المحول المثالي والتي يعبّر عنها كما يلي:

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}=a \qquad (2.11)$$

2.3.2 – المحول المثالي اثناء الحمل.

عند تحميل المحول المثالي بمعاوقة Z_L بين طرفي الثانوي تؤدي ق.د.ك E_2 الى تدفق التيار I_2 في الملف الثانوي منتجاً بدوره ق.د.م N_2I_2 مضادة لاتجاه ق.د.م الابتدائي N_1I_1. ويعود ذلك لكون I_2 يخرج من الجهة المنقوطة للملف الثانوي بينما يدخل I_1 الملف الابتدائي من الجهة المنقوطة للملف وكما في الشكل (8). وسيعمل ذلك على انقاص فيض اللب ومن تم ق.د.ك الملفين والاخلال بالتوازن بين E_1 و V_1. وسيؤدي ذلك الى سحب تيار اضافي من المصدر لمعادلة ق.د.م الثانوي واعادة التوازن بين E_1 و V_1 بالحفاظ على فيض اللب عند قيمته قبل التحميل.

ونظرا لان تيار الاثارة اللازم لمغنطة لب المحول المثالي والذي يتم سحبه من المصدر حتى عند اللاحمل يؤول الى الصفر، يمكن اعتبار تيار الابتدائي اللازم لمعادلة ق.د.م الثانوي يساوي كل التيار المسحوب من المصدر كما في الشكل (2.7) الذي يبين تيارات وجهود ملفي المحول المثالي المحمّل. ولكون ممانعة لب المحول المثالي ومن تم هبوط ق.د.م في اللب يؤول الى الصفر يمكن التعبير عن اتزان ق.د.م الملفين والحصول على القاعدة الثانية لعمل المحول المثالي كما يلي:



الشكل (8) المحول المثالي اثناء الحمل.

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \qquad (2.12)$$

وبالرغم من ان تعاكس ق.د.م الملفين الابتدائي والثانوي يوحي بتعاكس متجهي تيارتهما ، فإنه ينظر الى التيارين على انهما متطابقين طورياً وفقاً لاصطلاح الاشارات المتبع وكما في الشكل (2.7). فتبين المعادلتين (2.7) و (2.8) تطابق ق.د.ك الملفين كما سبق مما يعني ان جهودهما منطبقة طورياً. ولذلك يعد تساوي الازاحة الطورية بين تيار الثانوي وجهد كل من الملفين ومن تم تطابق تيار الملفين اكثر قبولاً وملائمة من الناحية العملية عند رسم المخطط الطوري.

وبذلك يتميز الملف الابتدائي للمحول بالتنظيم الذاتي اذ لايسحب التيار من المصدر الا بالقدر المطلوب لالغاء ق.د.م تيار الثانوي. ولكون المحول المثالي غير فاقد تكون القدرة الداخلة للابتدائي والقدرة الخارجة من الثانوي متساويتان وكما يتضح من ضرب المعادلتين (2.11) و (2.12) حيث نحصل على القاعدة الثالثة لعمل المحول المثالي كما يلي:

$$V1\, I1 = V2\, I2 \qquad (2.13)$$

ويمكن من الشكل (2.7) التعبير عن معاوقة الحمولة Z_L بقسمة جهد الثانوي على تياره، وعن قيمتها كما ينظر لها عند اطراف الابتدائي

Z'_L بقسمة جهد الابتدائي على تياره. وبالتعويض عن جهد وتيار الابتدائي في معادلة Z'_L بدلالة جهد وتيار الثانوي من المعادلتين (2.11) و (2.12) يمكننا ايجاد العلاقة بين Z_L و Z'_L ومن تم التعبير عن القاعدة الرابعة لعمل المحول المثالي كما يلي:

$$Z_L = \frac{V_2}{I_2}, \qquad Z'_L = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2(N_1/N_2)}{I_2(N_2/N_1)} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_2}{I_2} \tag{2.14}$$

$$Z'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L = a^2 Z_L, \qquad \frac{Z'_L}{Z_L} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = a^2 \tag{2.15}$$

وتمثل Z'_L المعاوقة Z_L منسوبة الى الابتدائي حيث يتضح ان المحول المثالي يمكنه تحويل المعاوقات كما ينظر اليها من ملفيه وفقا لمربع نسبة عدد لفاتهما فيما يسمى بموائمة المعاوقة.

4.2 - المحول الحقيقي.

نظرا لتعذر تحقيق الشروط المطلوبة في المحول المثالي عمليا فإن دراسة المحول الحقيقي (العملي) يجب ان تراعي الاختلاف بين الخواص الفعلية للمحول الحقيقي والخواص المفترضة في المحول المثالي. ولذلك فإن التحليل الدقيق للمحول الحقيقي يجب ان يأخذ في الاعتبار تأثير الفيض المتسرب ومقاومة الملفات وممانعة الدائرة المغناطيسية وفقد الحديد. وغالبا ما يقوم تحليل المحول على استخدام الدائرة المكافئة التي تعكس الخواص الفيزيائية والرياضية للمحول في شكل سهل التناول. ويمكن تمثيل تأثير الخواص الفيزيائية المختلفة للمحول الحقيقي في الدائرة المكافئة كما يلي:

(أ) تأثير تيار المغنطة وفقد اللب الحديدي:

نظرا لان نفاذية اللب الحديدي في المحول الحقيقي ليست مالانهاية فإن محصلة ق.د.م اللازمة لانشاء الفيض التبادلي خلال اللب ستكون اكبر من الصفر. ومن تم فإن تيار الاثارة الذي يسحبه المحول اثناء اللاحمل واللازم

لمغنطة اللب وتغذية مفقوداته لايصح اهماله في جميع الاحوال اثناء الحمل. وللاستفادة من نمدجة المحول المثالي يمكن النظر الى تيار الملف الابتدائي المسحوب من المصدر اثناء الحمل على انه يتكون من مركبتين مستقلتين. وتمثل الاولى مركبة تيار الحمل I'_2 اللازم لمعادلة ق.د.م الناتجة عن تدفق تيار الملف الثانوي I_2 اثناء الحمل ($N_1I'_2=N_2I_2$)، كما في المحول المثالي، وتمثل الثانية تيار الاثارة I_ϕ اللازم لاثارة اللب حيث $I_1=I'_2+I_\phi$ و $I'_2 \gg I_\phi$.

ولتمثيل فقد اللب ينظر الى تيار الاثارة اللازم لاثارة اللب على انه يضم مركبتين متعامدتين. وتمثل المركبة الاولى تيار المغنطة I_m اللازم لانتاج محصلة الفيض التبادلي والذي يسري في مفاعلة المغنطة X_m التي تمثل المحاثة التبادلية للدائرة المغناطيسية للمحول ويتأخر $90°$ عن ق.د.ك الابتدائي. وتمثل المركبة الثانية تيار الفقد I_c المنطبق طورياً على ق.د.ك الابتدائي واللازم لتغذية فقودات اللب الناتجة عن ظاهرتي التيار الدوامي والتخلف المغناطيسي والذي يسري خلال مقاومة وهمية موازية لمفاعلة المغنطة تسمى مقاومة فقد اللب R_c حيث $I_\phi=I_c+jI_m$ و $I_m \gg I_c$.

وعليه فإن تأثيرات تيار المغنطة وفقد اللب يمكن في جميع الاحوال احدهما في الحسبان بأضافة فرع المغنطة ذو المعاوقة Z_ϕ والتي يسري خلالها تيار الاثارة على التوازي مع الملف الابتدائي حيث يمكن التعبير عن المعاوقة Z_ϕ كما يلي ($X_m \gg R_c$):

$$Z_\phi = R_c \,//\, j\,X_m \qquad (2.16)$$

(ب) تأثير الفيض المتسرب ومقاومة الملفات:

نظرا لان الاقتران المغناطيسي بين الملفات لايمكن ان يكون كاملا فإن جزء من فيض كل ملف يتسرب دون ان يشبك الملف الاخر. ويعيب الفيض المتسرب كونه لايشارك في تبادل الطاقة بين الملفات وينتج ق.د.ك

مضادة للتيار المار في الملف المتسرب منه. ويمكن النظر الى الفيض المتسرب من الملف على انه يكافئ هبوط في جهد الملف ناشيء عن تدفق تيار الملف في محاثة تسرب وهمية تنتج عن تشابك الفيض المتسرب مع الملف ذاته.

ونظرا لأن سلك الملف رقيق وطويل فإن مقاومة الملف لا يصح اهمالها في الكثير من الحالات. ويكمن تأثير مقاومة الملف في الفقد الاومي فيها وهبوط الجهد الناتجين عن تدفق تيار الملف خلالها. ويمكن تمثيل الفيض المتسرب والفقد الاومي في الابتدائي بالنظر اليه على انه يضم معاوقة متوالية Z_1 تشمل مقاومة الملف R_1 على التوالي مع مفاعلة التسرب X_1. وبتطبيق نفس المبداء على الثانوي يمكن كتابة معادلات المعاوقة المتوالية للملفين الابتدائي والثانوي، على الترتيب، كما يلي:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \tag{2.17}$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \tag{2.18}$$

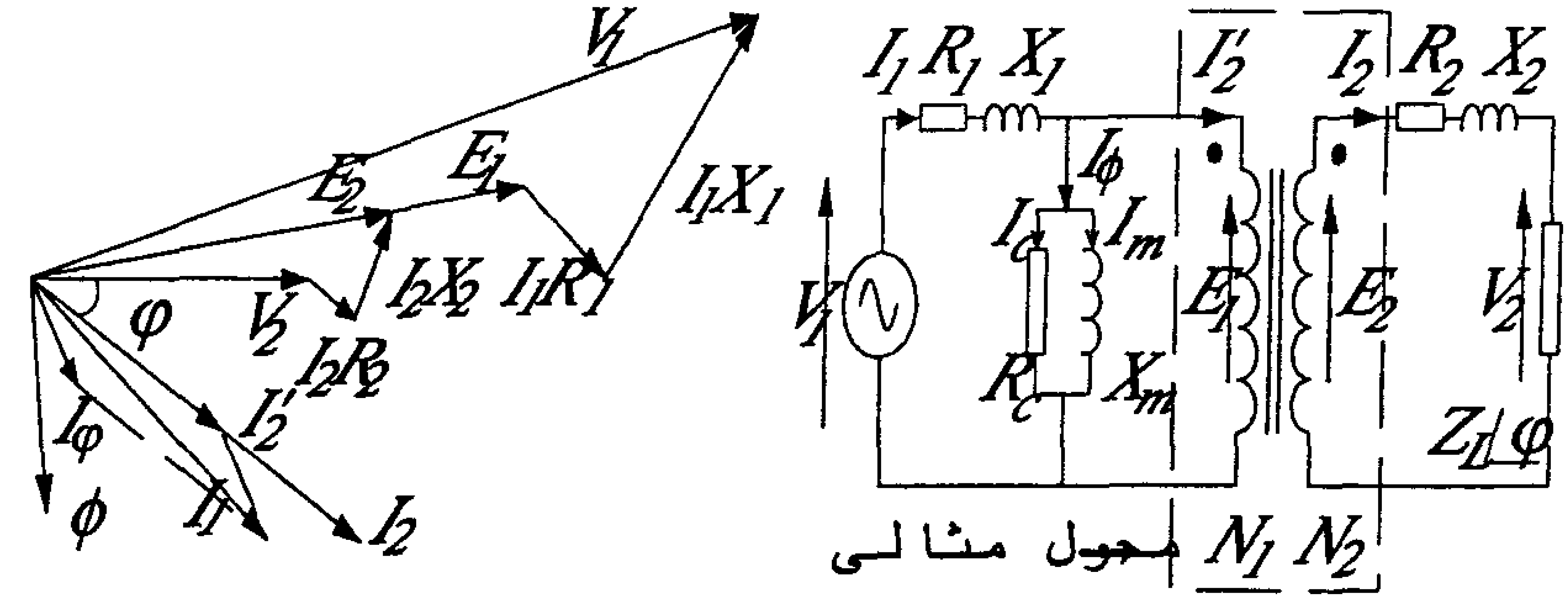
1.4.2 – الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي.

يمكن النظر الى المحول الحقيقي على انه يتكون من محول مثالي متصلة به بعض المعاوقات التي تعكس الخواص الفعلية التي يختلف فيها المحول الحقيقي عن المحول المثالي. وعليه يمكن الحصول على الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي من الدائرة المكافئة للمحول المثالي بادخال المعاوقتين Z_1 و Z_2 على التوالي مع دائرتي الملفين الابتدائي والثانوي على الترتيب ليمر تيار كل ملف خلال معاوقته المتصلة به. وبالاضافة الى ذلك تدخل معاوقة المغنطة Z_ϕ على التوازي مع ق.د.ك الملف الابتدائي. وبهذا نحصل على الدائرة المكافئة الدقيقة للمحول ومخططها الطوري كما في الشكل (9) حيث يمكن منهما كتابة المعادلات التالية للمحول الحقيقي (الحروف العريضة تمثل كميات متجهة):

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}'_2 + \mathbf{I}_\phi = \mathbf{I}'_2 + (I_c + jI_m)\square \tag{2.19}$$

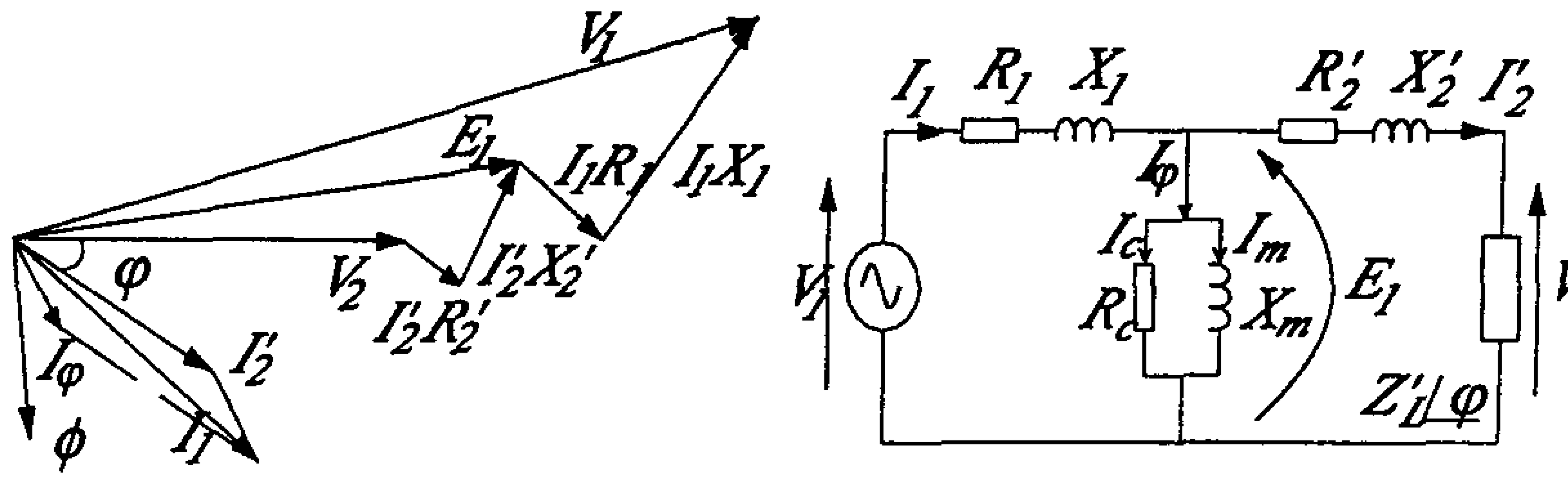
$$V_1 = E_1 + I_1 Z_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) \qquad (2.20)$$

$$V_2 = E_2 - I_2 Z_2 = E_2 - I_2 (R_2 + jX_2) \qquad (2.21)$$



الشكل (9) الدائرة المكافئة الدقيقة للمحول.

ومن قواعد عمل المحول المثالي المعطاه في المعادلات (2.11) و(2.12) و (2.15) يمكن على الترتيب تمثيل جميع الجهود والتيارات والمعاوقات الملحقة باحد الملفين بقيمتها منسوبة الى الملف الآخر. وعليه يمكن استبدال جميع معاوقات الملف الثانوي بقيمها منسوبة الى الملف الابتدائي ومن ثم التخلص من الدائرة المغناطيسية الممثلة للمحول المثالي في الدائرة المكافئة الدقيقة والحصول على الدائرة المكافئة الدقيقة منسوبة للابتدائي ومخططها الطوري كما في الشكل (10).

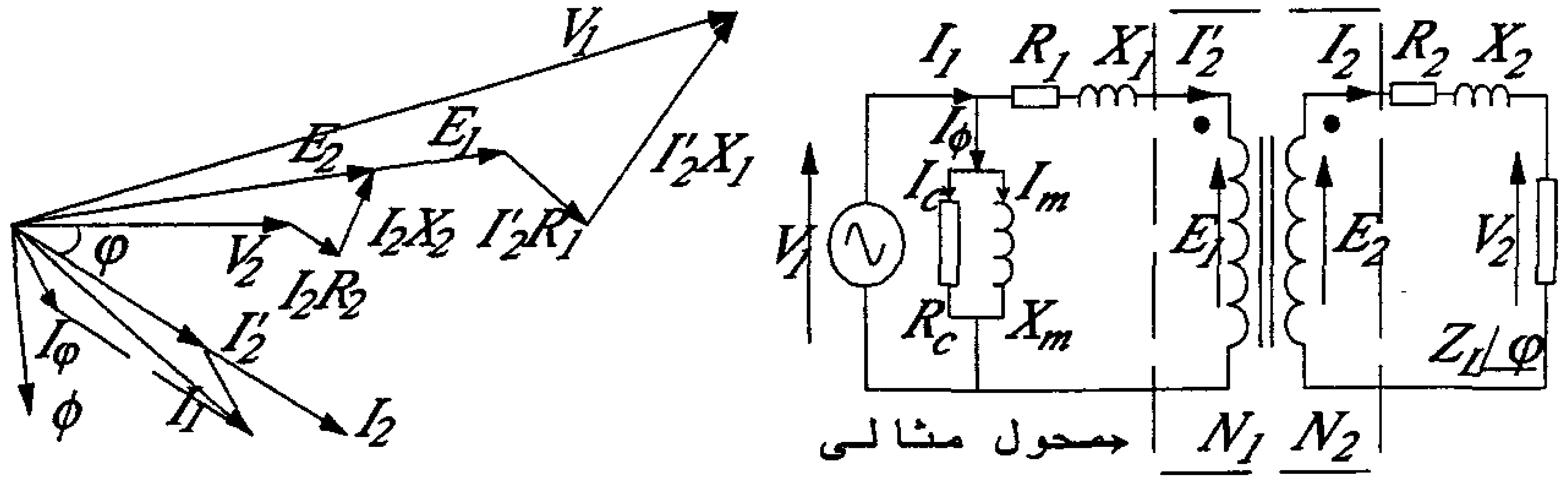


الشكل (10) الدائرة المكافئة الدقيقة منسوبة للابتدائي.

ويمكن الحصول على الدائرة المكافئة المنسوبة للابتدائي باستبدال دائرة الثانوي بأخرى مكافئة لها نفس عدد لفات الابتدائي وتعديل معاملاتها وفقاً لذلك. وبذلك ستكون نسبة عدد لفات المحول المثالي المبين في الشكل

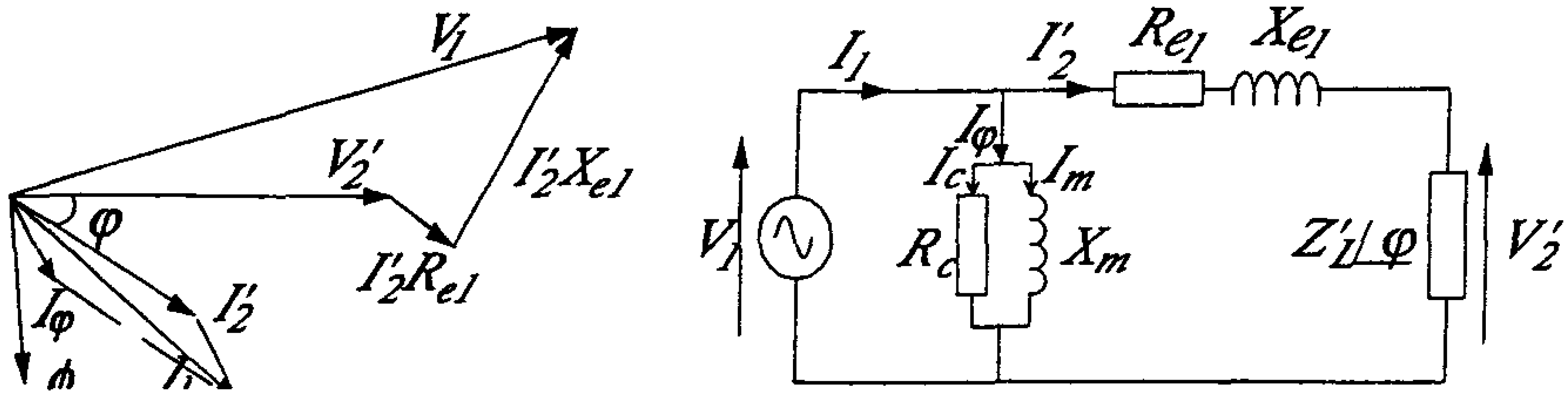
(9) واحد، وهو مايسمح بحذفه كما في الشكل (10). ومن الجدير بالذكر انه يمكن نسبة الدائرة المكافئة الى الثانوي بنفس الكيفية مع مراعات عكس نسب التحويل.

يعيب الدائرة المكافئة الدقيقة للمحول صعوبة اختصار معاملاتها وقياس هذه المعاملات عملياً. وعادةً لايتجاوز تيار الاثارة I_ϕ حوالي 5% من تيار الابتدائي I_1 ويكون هبوط الجهد والفقد الناتجين عن مرور I_ϕ في المعاوقة Z_1 صغيرين ويمكن اهمالهما ذمع شئ من التقريب الذي لايخل بدقة النتائج. وبذلك يمكن اعادة رسم الدائرة المكافئة الدقيقة المبينة في الشكل (9) بنقل فرع المغنطة الى اطراف الملف الابتدائي كما في الشكل (11) الذي يمثل الدائرة المكافئة التقريبية للمحول.



الشكل (11) الدائرة المكافئة التقريبية للمحول.

وتبرز ميزة الدائرة المكافئة التقريبية عند نسبتها الى احد الملفين، كما في الدائرة المكافئة التقريبية المنسوبة للابتدائي المبينة في الشكل (12). وهنا يمكن تمثيل المحول بمعاوقتين فقط هما معاوقة المغنطة Z_ϕ على التوازي مع المصدر والمعاوقة المكافئة منسوبة للابتدائي Z_{e1} على التوالي مع الحمولة، حيث:

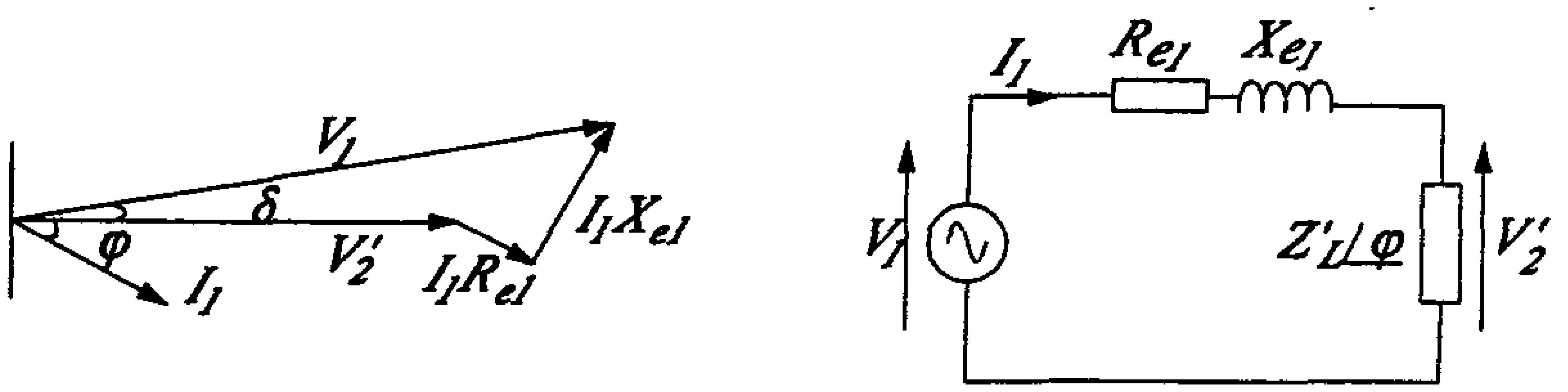


الشكل (12) الدائرة المكافئة التقريبية منسوبة للابتدائي.

$$Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1} \qquad (2.22)$$

$$R_{e1} = R_1 + R'_2, \quad X_{e1} = X_1 + X'_2 \qquad (2.23)$$

ولزيادة التبسيط يمكن في بعض الحالات اهمال تيار الاثارة كلياً من الدائرة المكافئة للحصول على الدائرة المكافئة المبسطة المنسوبة للابتدائي والمبينة في الشكل (13). ويميز استخدام الدائرة المكافئة المبسطة منسوبة للابتدائي تمثيل المحول بالمعاوقة المكافئة على التوالي مع الحمولة فقط، وهي عادةً ما تستخدم في نمذجة المحولات في التحليلات التي تشمل باقي مكونات منظومات القوى.



الشكل (13) الدائرة المكافئة المبسطة للمحول.

5.2 - بيانات واختبارات المحول.

توفر الدائرة المكافئة نموذج مناسب لمحاكاة ودراسة اداء المحول عند ظروف التحميل المختلفة عند معرفة معاملات الدائرة ومقننات القدرة والجهد. وتشمل بطاقة بيانات المحول مقنن قدرة S لجانبيه ومقننات الجهد V_{HV} لجانب الجهد العالى و V_{LV} لجانب الجهد المنخفض وترتيب لفائف

كل منهما ، دون ذكر معاملات الدائرة المكافئة. ويمكن من هذه البيانات التعبير عن نسبة التحويل (نسبة اللفات) a ومقنن تيار جانب الجهد العالي I_{HV} وجانب الجهد المنخفض I_{LV} كما يلي:

$$a = \frac{V_{HV}}{V_{LV}}, \qquad I_{LV} = \frac{S}{V_{LV}}, \qquad I_{HV} = \frac{S}{V_{HV}}$$

ووفقاً لذلك سيتدفق عند الحمل المقنن التيار المقنن في كل جانب سواءً كان ابتدائي ام ثانوي. وفي الواقع سيسحب الجانب الابتدائي من المصدر تيار اثارة اضافي اصغر من التيار المقنن بكثير. ولاتشمل بطاقة بيانات المحول في الغالب معاملات الدائرة المكافئة ولا بيانات التصميم اللازمة لحسابها. ولحسن الحظ يمكن ايجاد هذه المعاملات باجراء بعض الاختبارات القياسية البسيطة.

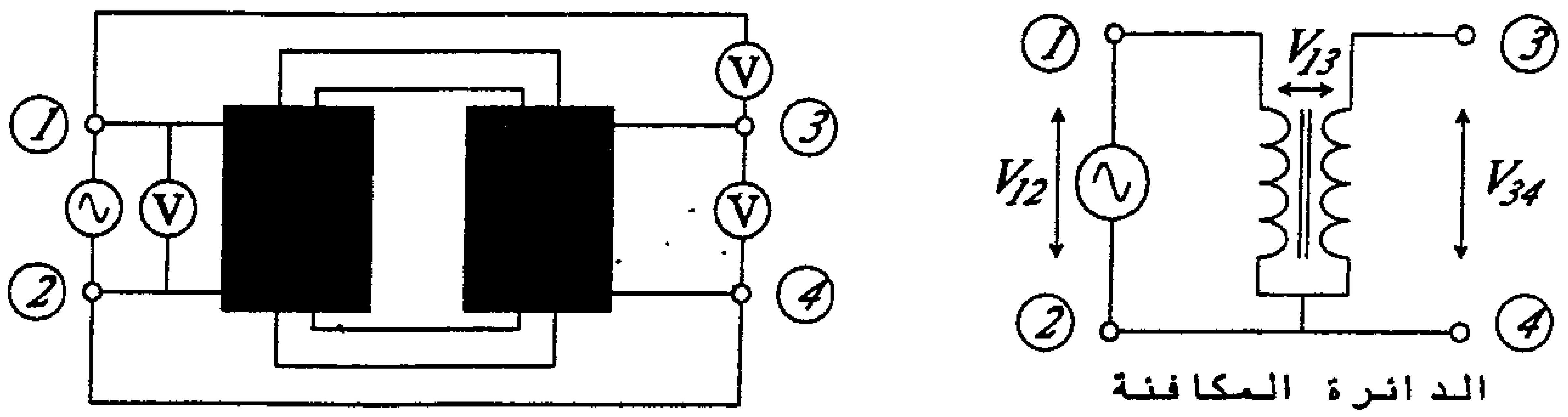
1.5.2 – اختبار القطبية.

عادةً ما تكون لفائف المحول محاطةً بوعاء او اطار لا تبرز منه سوى نهايات الملفات متصلة بنقاط التوصيل. وتوضع عند نقاط التوصيل علامات توضّح نهايات كل ملف وتبين النهايات ذات القطبية المتشابهة. وتحدد قطبية نهايات الملفات بالنسة لبعضها البعض العلاقة الطورية بين جهودها بالتطابق او التعاكس الطوري. وتعرف نهايات ذات القطبية المتشابهة بانها نهايات التي تكون عندها قطبية ق.د.ك المحتثة في الملفات نتيجة للفيض المتبادل متشابهة. وقد تم تحديد هذه القطبية بعلامة النقطة في الدوائر المكافئة في الشكلين (9) و (11). ويجب معرفة قطبية نهايات الملفات فيزيائياً بدقة ، وخصوصاً عند توصيل المحولات على التوازي لضمان تشغيلها بصورة صحيحة وآمنة.

وفي الحالات التي لاتتوفر فيها علامات كافية لتحديد نهايات وقطبية الملفات يمكن التعرف على نهايات ملف الجهد العالي وملف الجهد المنخفض بواسطة اوميتر وكما في اختبار التوصيل البسيط. وعند الضرورة يمكن التفريق بدقة بين ملف الجهد العالي والجهد المنخفض بقياس

مقاومتهما مباشرةً باستخدام مصدر تيار مستمر مناسب واميتر وفولتمير. اما التعرف على قطبية نهايات الملفات بالنسبة لبعضهما البعض، وهو مايحدده اتجاه لف هذه الملفات، فيتطلب اجراء اختبار آخر.

ومن ابسط الطرق لاختبار قطبية نهايات ملفات المحول تلك المبينة في الشكل (14) حيث تم تعريف نهايتي احد الملفين بالعلامتين ① و ②، ونهايتي الملف الآخر بالعلامتين ③ و ④. ولاجراء الاختبار يتم توصيل النهاتين ② و ④ معاً وتوصيل فولتيمترات بين طرفي كل ملف وبين النقطتين ① و ③. وبتوصيل الملف ذو النهايتن ① و ② بمصدر تيار متردد ذو جهد مناسب وقياس الجهود $V12$ و $V34$ و $V13$ يمكن تحديد قطبية نهايات الملفات ببساطة بمقارنة قيم هذه الجهود.

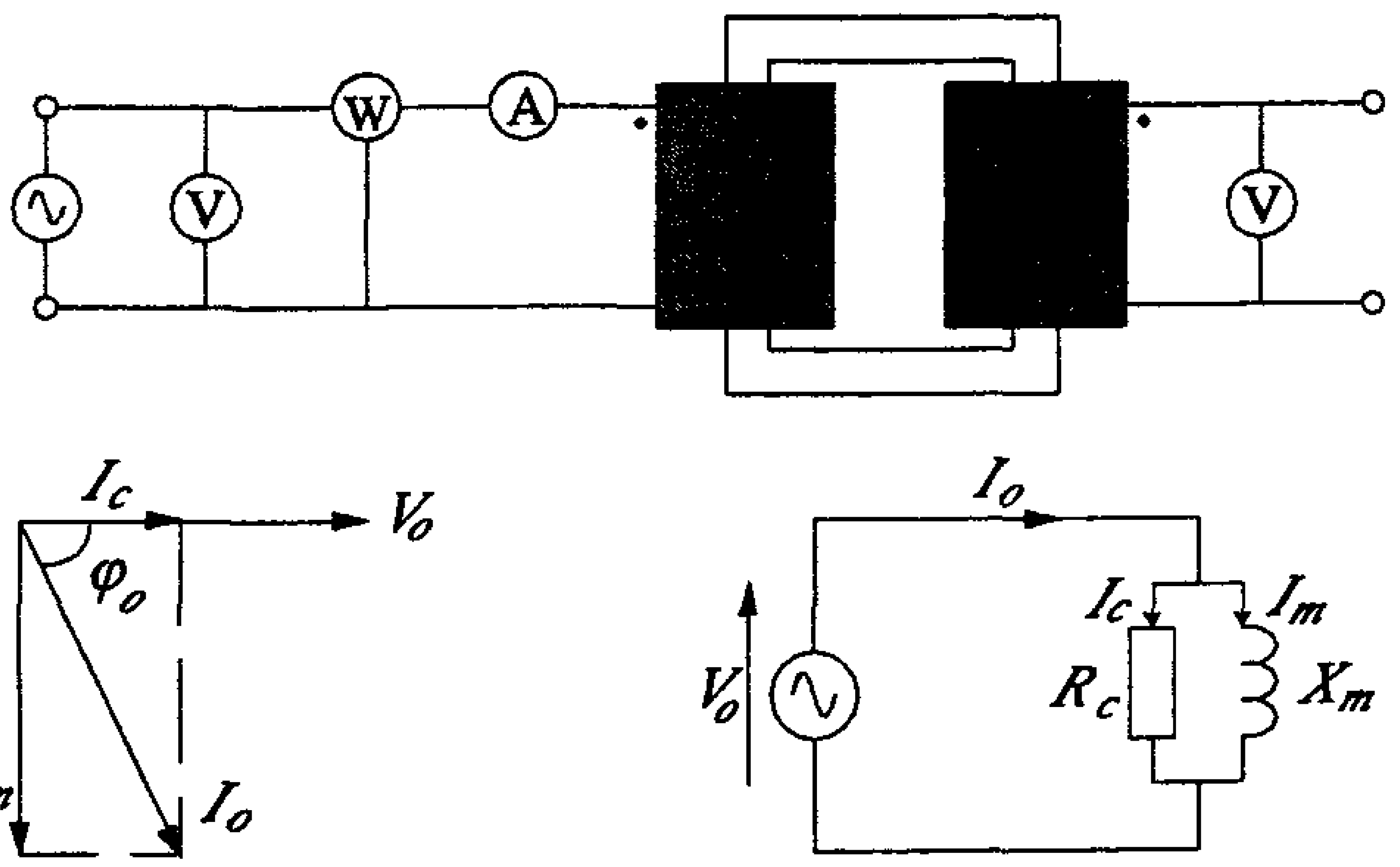


الشكل (14) اختبار قطبية لفائف المحول.

فاذا كان $V13 \approx V12 - V34$، فسيعنى ذلك انه في أي لحظة تكون ① موجبة بالنسبة الى ② تكون ③ موجبة بالنسبة الى ④، وبذلك تكون النهايتين ① و ③ ذات قطبية متشابهة، وتكون ق.د.ك E_{12} و E_{34} متعاكسة طورياً وهما يمثلان مصدرين موصولين على التوالي في قطبية متعاكسة. اما اذا كان $V13 \approx V12 + V34$، فسيعنى ذلك انه في أي لحظة تكون ① موجبة بالنسبة الى ② تكون ③ سالبة بالنسبة الى ④، وبذلك تكون النهايتين ① و ③ ذات قطبية متعاكسة، وتكون ق.د.ك $E12$ و $E34$ منطبقة طورياً وهما يمثلان مصدرين موصولين على التوالي في قطبية متشابهة.

2.5.2 - اختبار اللاحمل

بينما يمكن قياس مقاومة الملفات مباشرةً باستخدام مصدر تيار مستمر مناسب واميتر وفولتمير، فهذا لايكفي لمعرفة كل معاملات الدائرة المكافئة متمثلةً في المفاعلة المكافئة للملفات ومعاوقة المغنطة. ويمكن عملياً الحصول على المعلومات اللازمة لتعيين قيم كل المعاملات مباشرة بواسطة كل من اختبار اللاحمل واختبار القصر او اختبار التعاكس وقد يضاف لذلك اختبار فصل فقودات اللب. ويجرى اختبار اللاحمل او اختبار الدائرة المفتوحة بتسليط جهد لايتجاوز القيمة المقننة على اطراف الملف الابتدائي للمحول مع ترك الملف الثانوي مفتوح حيث يستخدم ملف الجهد المنخفض كملف ابتدائي لسهولة الحصول على مصدر جهد منخفض مناسب، كما في الشكل (15).



الشكل (15) الدائرة المكافئة لاختبار اللاحمل.

وفي هذه الحالة لن يسحب المحول سوى تيار الاثارة الذي لايتعدى حوالي 5% من التيار مقنن. ونظرا لان المعاوقة المكافئة لفرع المغنطة اكبر بكثير من معاوقة الملف الابتدائي يمكن اهمال الفقد وهبوط الجهد الناتجين في معاوقة الملف الابتدائي دون تأثير يذكر في دقة النتائج. وبهذا تمثل القدرة الداخلة للمحول عند اللاحمل فقد اللب او فقد الحديد P_i الذي

يساوي مجموع فقد التخلف وفقد التيار الدوامي والذين يتناسبان مع مربع جهد الابتدائي تقريباً.

وبناء على ذلك يمكن اختصار الدائرة المكافئة التقريبية للمحول اثناء اللاحمل واعادة رسمها كما في الشكل (15). واذا كان الجهد المسلط على الملف الابتدائي V_O وتيار اللاحمل المقاس I_O والقدرة الداخلة المقاسة P_O نحصل من نتائج الاختبار اللاحمل على مركبات تيار الاثارة ومن تم مقاومة فقد اللب R_C ومفاعلة المغنطة X_m كما يلي:

$$\theta_o = cos^{-1}\left(\frac{P_o}{V_o I_o}\right), \qquad I_O = I_C + jI_m \tag{2.25}$$

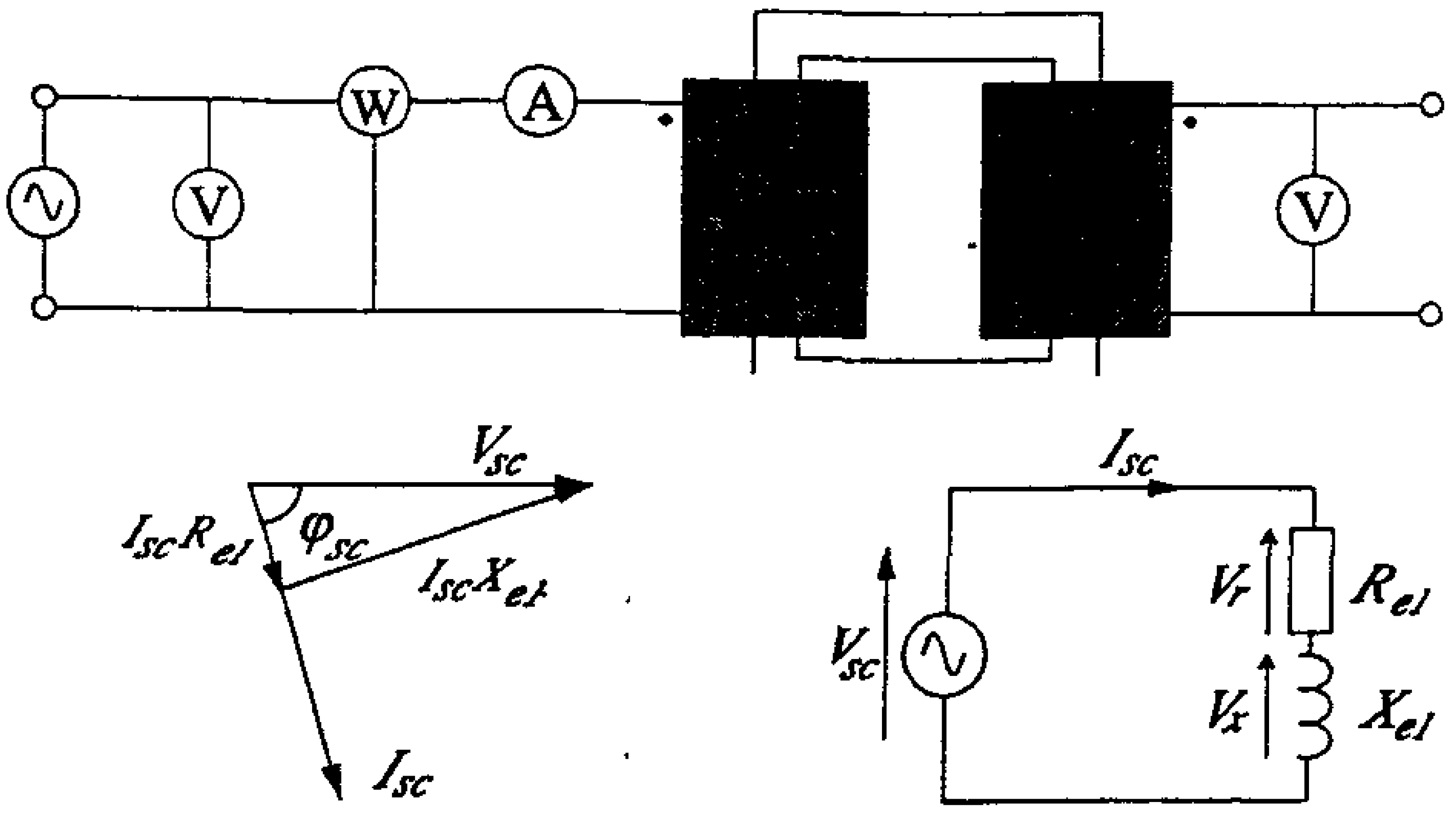
$$P_i = P_O = \text{فقد الحديد} \tag{2.26}$$

$$R_c = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{V_o}{I_o \cos\theta_o} \tag{2.27}$$

$$X_c = \frac{V_o}{I_o sin\theta_o} \tag{2.28}$$

3.5.2 – اختبار القصر.

في اختبار القصر تقصر اطراف الثانوي ويسلط على الابتدائي جهد مناسب بحيث لا يتعدى تيار الملفين القيمة المقننة. ولكون الجهد المطلوب لايتجاوز حوالي 5% من مقنن الجهد، عادة مايختار ملف الجهد العالي كملف ابتدائي لسهولة الحصول على مصدر جهد مناسب، وكما في الشكل (16). ولكون الجهد المسلط على الابتدائي صغير جداً ومعاوقة المغنطة اكبر بكثير من المعاوقة المكافئة يكون تيار الاثارة صغير جداً مقارنة بتيار الحمولة ويمكن اهماله دون تأثير يذكر في دقة النتائج.



الشكل (16) الدائرة المكافئة لاختبار القصر.

بذلك تمثل القدرة الداخلة للمحول فقد النحاس P_C في مقاومة الملفات والذي يتناسب مع مربع التيار، ويمثل الجهد السلط هبوط الجهد في المعاوقة المكافئة منسوبة للابتدائي. وبذلك يمكن اختصار الدائرة المكافئة التقريبية للمحول اثناء القصر كما في الشكل (16). واذا كان الجهد المسلط على الملف الابتدائي V_{SC} وتياره I_{SC} والقدرة الداخلة P_{SC} نحصل من نتائج الاختبار على المعاوقة المكافئة $Ze1$ ومن تم المقاومة المكافئة $Ze1$ والمفاعلة المكافئة $Xe1$ للمحول كما في المعادلات التالية:

$$\theta_{sc} = cos^{-1}\left(\frac{P_{sc}}{V_{sx}I_{sc}}\right), \qquad Z_{el} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \tag{2.29}$$

$$P_C = P_{SC} = \text{فقد النحاس} \tag{2.30}$$

$$R_{el} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^{\ 2}} = Ze1\ cos\ \theta_{SC} \tag{2.31}$$

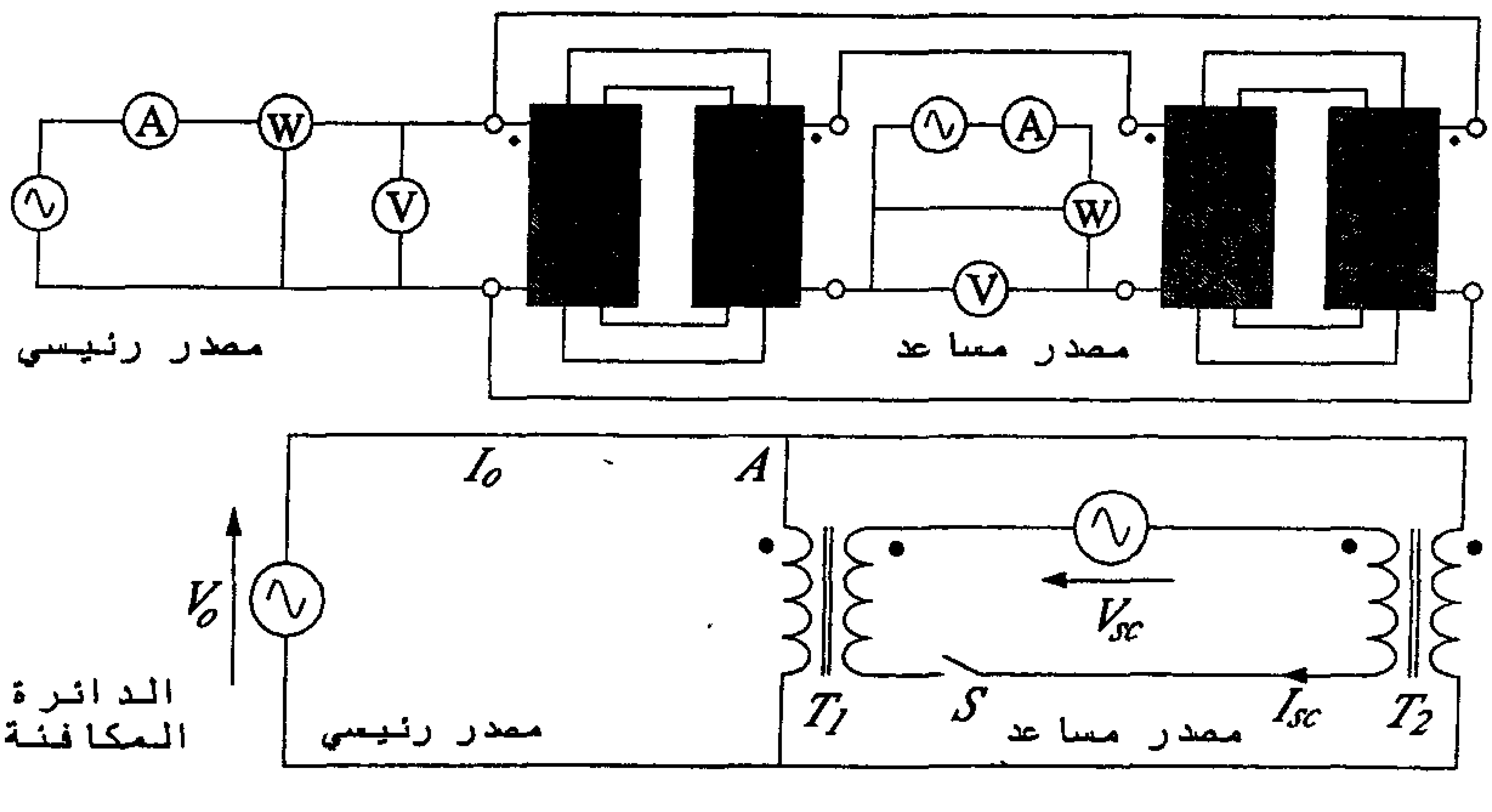
$$X_{el} = \sqrt{\left(Z_{sc}^{\ 2} - R_{sc}^{\ 2}\right)} = Ze1\ cos\ \theta_{SC} \tag{2.32}$$

ويمكن تقريبياً فك المعاوقة المكافئة المنسوبة للابتدائي وتعيين معاوقة كل ملف على حده بقياس مقاومة الملفين للتيار المستمر وافتراض ان النسبة بين مقاومة الملفين للتيار المتناوب وكذلك النسبة بين مفاعلة التسرب لهما تساوي النسبة بين مقاومتهما للتيار المستمر.

4.5.2 – اختبار التعاكس.

يجرى اختبار التعاكس لتعيين مفاقيد المحول عند ظروف مماثلة لظروف التحميل الفعلي حيث يتم تحميل المحول اصطناعيا بدون استهلاك قدرة كبيرة، وقد يسمى احياناً باختبار التحميل او اختبار سمبنر. ويستخدم في ذلك محولان متشابهان يوصلان على التوازي بالمصدر الرئيسي لتكون جهودهما الثانوية متعاكسة كما في الشكل (17). وهنا لن يتدفق التيار في الملفات الثانوية ولن يسحب المحولان من المصدر الرئيسي سوى فقد الحديد كما في اختبار اللاحمل.

وبتغذية الملفات الثانوية على التوالي من مصدر مساعد منخفض الجهد سيتدفق فيهما تيار قصر. ونظرا لان قطبية الملفين الثانوين متعاكسة ستكون التيارات الابتدائية الناتجة كذلك متعاكسة حيث يضاف تيار القصر الى تيار احد الابتدائين ويطرح من الآخر، مع بقاء التيار والقدرة المسحوبين من المصدر الرئيسي كما هما. ولذلك سوف لن يسحب المحولين من المصدر المساعد سوى تيار القصر الذي يدور بينهما وفقد النحاس كما في اختبار القصر. وبقياس جهود وتيارات المصدرين والقدرات المسحوبة يمكن تعيين معاملات المحول كما في اختباري اللاحمل والقصر.



الشكل (17) دائرة اختبار التعاكس.

5.5.2 – فصل مركبات فقد الحديد.

يعتمد حجم فقد التخلف المغناطيسي وفقد التيارات الدوامية والذين يمثلان فقد الحديد في المحول على التردد وكثافة الفيض العظمى. ويمكن من اساسيات الكهرومغناطيسية التعبير عن كل من فقد التخلف المغناطيسي P_h وفقد التيارات الدوامية P_e بدلالة التردد f وكثافة الفيض العظمى B_{max}، ومن تم الحصول على المعادلة العامة لفقد الحديد P_i من مجموعهما كما يلي:

$$P_i = P_h + P_e = K_h f B_{max}^n + K_e f^2 B_{max}^2 \qquad (2.33)$$

وتحدد الخصائص الكهرومغناطيسية لمادة اللب وابعاد مقطعه المعاملات K_h و K_e و n، وتتطلب معرفتها حل ثلاثة معادلات آنية يمكن الحصول عليها بقياس فقد اللب لثلاثة حالات P_1 و P_2 و P_3 لتردد وكثافة فيض عظمى B_1, f_1 و B_2, f_2 و B_2, f_1 على الترتيب وكما يلي:

$$P_1 = K_h f_1 B_1^n + K_e f_1{}^2 B_1^2 \qquad (2.34)$$

$$P_2 = K_h f_2 B_2^n + K_e f_2{}^2 B_2^2 \qquad (2.35)$$

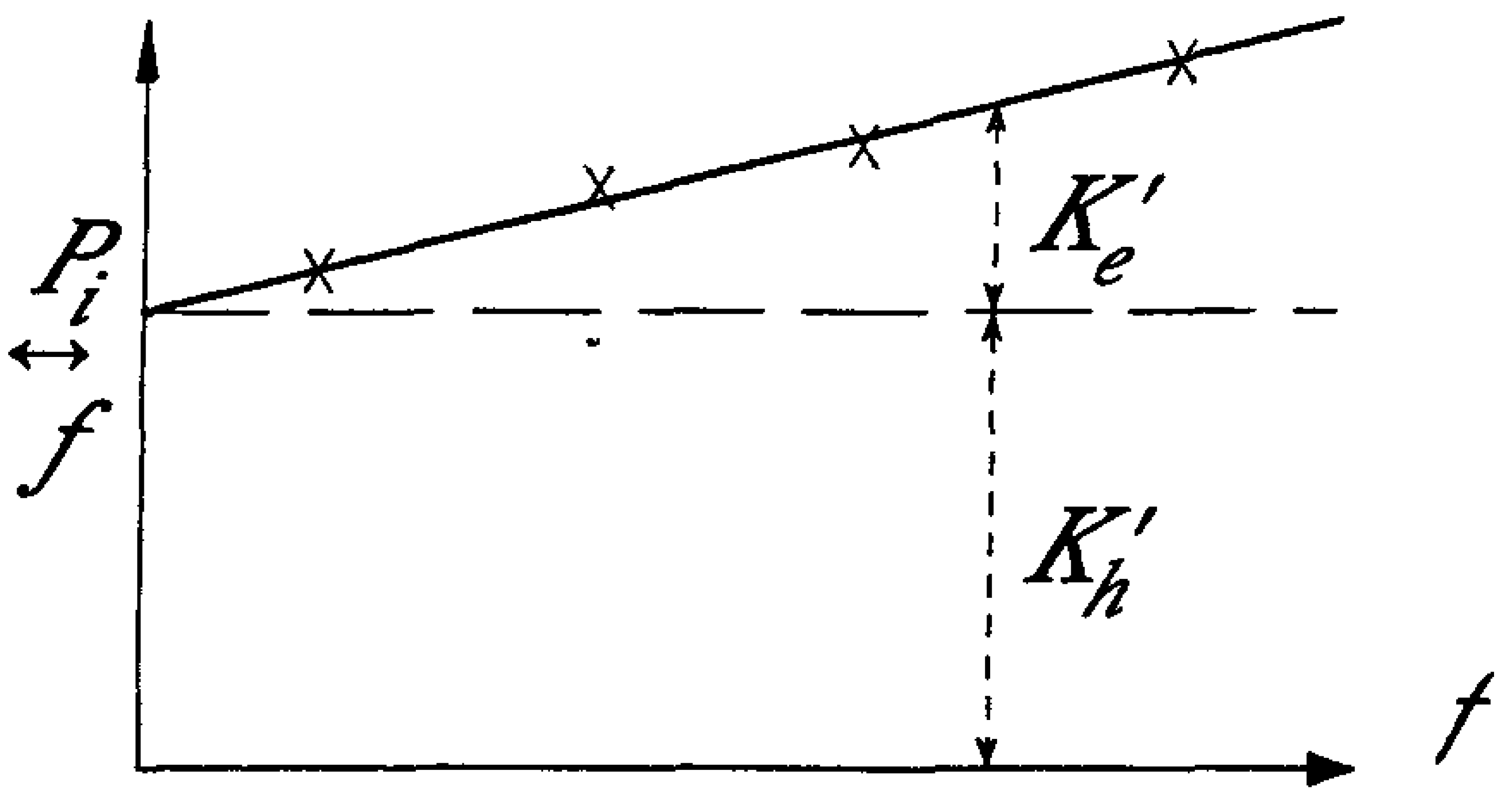
$$P_3 = K_h f_1 B_2^n + K_e f_1{}^2 B_2^2 \qquad (2.36)$$

وعند ثبوت كثافة العظمى ومعرفة المعامل n (ولتكن 1.6 مثلاً) يمكن بقسمة طرفي المعادلة (2.33) على f التعبير عن فقد الحديد لكل دورة بمعادلة خط مستقيم من الدرجة الاولى كما يلي:

$$P_i / f = K_h B_{max}^{1.6} + K_e f B_{max}^2 = K'_h + K'_e f \qquad (2.37)$$

ويمكن باجراء اختبار اللاحمل لقياس فقد الحديد عند ترددات مختلفة رسم خط المعادلة (2.34) كما في الشكل (18) حيث يمكن ضمان ثبوت B_{max} بابقاء النسبة $(E_1/f \approx V_1/f)$ ثابتة اثناء الاختبار وكما

يتبين من المعادلة (2.9). ويمثل تقاطع الخط المستقيم مع محور P_i/f في الشكل (2.17) فقد التخلف المغناطيسي لكل دورة، بينما يمثل ميل الخط فقد التيارات الدوامية لكل دورة مربعة.



الشكل (18) العلاقة بين مركبات فقد الحديد والتردد.

6.2 - كفاءة المحول.

تمتاز محولات القدرة بكفائتها العالية مقارنةً بغيرها من الآلات الكهربائية. وتحدد الكفاءة تكلفة التشغيل وتعد من العوامل الاساسية التي تؤخد في الاعتبار عند المفاضلة بين المحولات المختلفة. وكما هو الحال مع أي اداة لتحويل القدرة تحسب كفاءة المحول كنسبة القدرة الخارجة الى القدرة الداخلة حيث يمثل الفرق بين القدرتين الفقد الكلي الذي يضم فقد الحديد وفقد النحاس. واذا كانت القدرة الداخلة P_{in} والقدرة الخارجة P_{out} والفقد الكلي P_{loss} يمكن حساب كفاءة المحول η كما يلي:

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} \quad (2.38)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (2.39)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (2.40)$$

واذا كـان معامـل قـدرة الحمولـة cosφ وفقـد الحديـد P_i وفقـد النحاس P_c يمكـن مـن الـدائرة المكافئـة التقريبيـة للمحـول منسـوبة للثـانوي حساب كفاءة المحول باستخدام صيغة المعادلة (2.40) كما يلي:

$$R_{e2} = R_2 + R_1 (N_2 / N_1)^2$$

$$P_c = I_1^2 R_{e1} = I_2^2 R_{e2} \tag{2.41}$$

$$P_i = I_c^2 R_c = V_1^2 / R_c \tag{2.42}$$

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos \varphi \quad , \qquad P_{loss} = P_c + P_i \tag{2.43}$$

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi}{V_2 I_2 \cos\varphi + I_2^2 R_{e2} + V_2^2 / R_c} \tag{2.44}$$

وتـبين المعادلـة (2.44) لاخطيـة العلاقـة بـين كفـاءة المحـول وتيـار الحمولـة حيـث تبلـغ الكفـاءة قيمتهـا العظمـى عنـد حمولـة محـددة. ويمكـن باستخدام نظرية النهاية العظمى ايجـاد I_2 التـى تجعـل دالـة المعادلـة (2.44) اكبر ما يمكن. وباعادة صياغة المعادلة والغـاء I_2 مـن البسـط يكفـي لـذلك ايجاد I_2 التى يكون عندها مقام المعادلة اصغر ما يمكـن باسـتخدام نظريـة النهاية الصغرى. وسيحدث ذلك عندما يكـون التفاضـل الاول للمقـام المعـدّل بالنسبة للتيار I_2 صفر وتفاضله الثاني موجب وذلك كما يلي:

$$\eta = \frac{V_2 \cos\varphi}{V_2 \cos\varphi + I_2 R_{e2} + P_i / I_2}$$

$$\frac{d}{dI_2}(V_2 \cos \varphi + I_2 R_{e2} + P_i / I_2) = R_{e2} - P_i / I_2^2$$

$$\frac{d^2}{dI_2}(V_2 \cos \varphi + I_2 R_{e2} + P_i / I_2) = 2P_i / I_2^3 \tag{2.45}$$

$$R_{e2} - P_i / I_2^2 = 0 \quad , \qquad I_2^2 R_{e2} = P_c = P_i \tag{2.46}$$

وتبين المعادلة (2.45) ان التفاضل الثاني للمقام بالنسبة الى I_2 كمية موجبة وهو ما يؤكد ان I_2 الناتجة عن جعل التفاضل الاول للمقام صفر ستعطي القيمة الصغرى للمقام وليس القيمة العظمى. وبذلك يتضح من المعادلة (2.46) ان القيمة الصغرى للمقام ومن تم القيمة العظمى للكفاءة للمحول تحدث عند الحمولة التي تجعل فقد نحاس مساوياً لفقد الحديد. ومن النظرة الاقتصادية فإن المحول الذي يشتغل بشكل متواصل عند حمولة مقننة يفضل ان تحدث كفائته العظمى عند تلك الحمولة.

ويجب عند حساب الكفاءة لمستويات تحميل مختلفة للمحول مراعاة ان الكفاءة المتغيرة تعتمد على كل من مستوى الحمولة ومعامل قدرتها. كما ان فقد النحاس يتغير مع الحمولة ويتناسب مع مربع (تيار) الحمولة، وفقد الحديد ثابت لايتغير مع الحمولة لكونه يتناسب مع مربع جهد المصدر الثابت كما يتضح من المعادلتين (2.41) و (2.42). ولكون فقد النحاس يعتمد على التيار وفقد الحديد يعتمد على الجهد فإن الفقد الكلي يعتمد على حاصل ضرب الجهد والتيار. ولذلك يعطى مقنن قدرة المحول، الذي يحدده مقدار الحرارة الناتجة عن الفقد، بالفولت- امبير وليس بالوات.

ونظرا لتغير حمل محولات النقل والتوزيع بشكل مستمر خلال اليوم يفضل تقييم الآداء المتواصل للمحول بحساب الكفاءة اليومية η_{day} والتي تعرف بنسبة الطاقة الخارجة الكلي الى الطاقة الداخلة الكلية بالكيلووات-ساعة على مدى الاربعة وعشرون ساعة وذلك كما يلي:

$$\eta_{day} = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{W_{out}}{W_{out} + W_{loss}} \tag{2.47}$$

$$W_{out} = \Sigma P_{outk}\, t_k , \quad W_{loss} = \Sigma P_{lossk}\, t_k , \quad k = 1,2,3,\ldots$$

اي ان W_{out} تمثل مجموع حاصل ضرب حمولة كل فترة بالكيلووات في مدتها بالساعات خلال اليوم. وتحسب W_{loss} بنفس الكيفية مع ملاحظة ثبوت فقد الحديد وتغير فقد النحاس مع مربع الحمل.

2 .7- تنظيم جهد المحول.

تمتاز المحولات بالاضافة الى الكفاءة العالية بقيمة منخفضة جدا لتنظيم الجهد مقارنة بغيرها من الآلات الكهربائية ومصادر الجهد الاخرى. ويحدد تنظيم جهد المحول مدى ملائمتة وقدرته على آداءه للمهمة المنوطة به في المحافظة على جهد الحمولة ضمن نطاق محدد وعند مستويات التحميل المختلفة. ومن المهم هنا مراعات ان مقننات الجهد المعطاة في لوحة بيانات المحول تشير الى جهد اطراف الملف الثانوي للمحول اثناء اللاحمل، وعند تسليط الجهد المقنن على الابتدائي.

وبافتراض ثبوت جهد المصدر المغذي للملف الابتدائي وكما هو الحال في العادة فإن جهد اطراف الملف الثانوي سينخفض للاحمال الحثية (ويرتفع للاحمال السعوية) بين اللاحمل والحمولة التامة وبما يتناسب عكسياً مع مستوى التحميل. وتعود زيادة ونقصان جهد الثانوي بين اللاحمل والحمل الى هبوط وارتفاع الجهد في المعاوقه المكافئة للمحول كما يتضح من الدائرة المكافئة التقريبية المنسوبة للابتدائي والمبينة في الشكل (12).

وفي الحالات الاعتيادية يعتبر تغير جهد الثانوي مع تغير الحمولة امراً غير مرغوباً ويجب الحد منه. ونظراً لان هبوط الجهد، الذي هو ببساطة حاصل ضرب تيار الحمولة في المعاوقة المكافئة كما يتضح من الشكل (12)، يعتمد على تيار الحمولة فإن تنظيم الجهد يتغير مع كل من مقدار الحمولة ومعامل قدرتها. ويعرف تنظيم جهد المحول ε بمقدار التغير في مقدار جهد اطراف الثانوي بين اللاحمل والحمل الكامل كنسبة من جهد اللاحمل وكما يعبر عنه في المعادلة التالية:

$$\varepsilon = \frac{V_{20} - V_2}{V_2} \qquad (2.48)$$

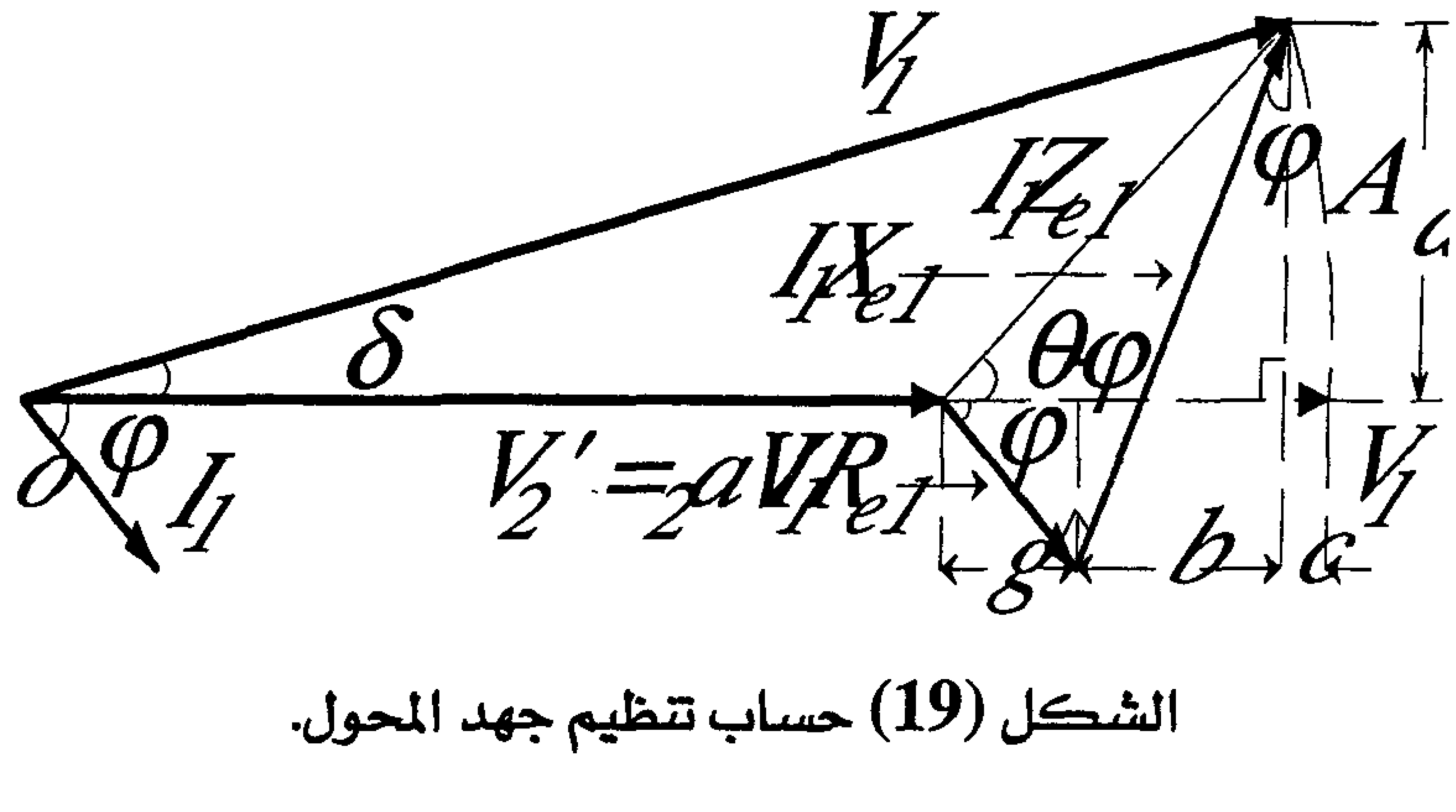
ومن الدائرة المكافئة التقريبية منسوبة للابتدائي والمبينة في الشكل (12) نحصل عند اللاحمل حيث ($I'_2=0$) على مقدار جهد الملف الثانوي V_{20} بدلالة V_1 ومن ثم يمكن بالتعويض عن V_{20} في المعادلة (2.48) التعبير عن تنظيم الجهد كما يلي:

$$a = N_1 / N_2 \qquad (2.49)$$

$$V_{20} = E_2 = E_1/a = V_1/a \qquad (2.50)$$

$$\varepsilon = \frac{V_1/a - V_2}{V_1/a} = \frac{V_1 - aV_2}{V_1} \qquad (2.51)$$

وباهمال تيار المغنطة يمكن حساب تنظيم الجهد من المخطط الطوري للدائرة المكافئة المبسطة منسوبة للابتدائي المبين في الشكل (19) حيث A قوس في دائرة نصف قطرها V_1 ومركزها o. فاذا كانت الحمولة حثية وزاوية معامل قدرتها $\cos\varphi$ يمكن التعبير عن جهد الابتدائي بدلالة جهد الثانوي منسوباً الى الابتدائي وهبوط الجهد في المعاوقة المكافئة منسوبة للابتدائي كما يلي:



الشكل (19) حساب تنظيم جهد المحول.

$$V_1 = aV_2 + g + b + c = \sqrt{\{(aV_2 + g + b)^2 + d^2\}}$$

$$= \sqrt{\{(aV_2 + I_1 R_{e1} \cos\varphi + I_1 X_{e1} \sin\varphi)^2 + (I_1 X_{e1} \cos\varphi - I_1 R_{e1} \sin\varphi)^2\}} \quad (2.52)$$

وتمثل c الفارق بين V_1 ومركبته الحقيقية وهي تعكس دور المركبة التخيلية d في طول V_1. وفي الحياة العملية عادةً ما يكون هبوط الجهد في المعاوقة المكافئة صغير جداً مقارنةً بكل من V_1 و aV_2 مما يجعل c صغيرةً جداً ويمكن اهمالها عند حساب V_1 دون احداث خطأ كبير. وبذلك يمكن التعبير تقريبياً من المعادلة (2.52) عن الفارق بين V1 و aV2 وتنظيم جهد المحول ε كما يلي:

$$V_1 \approx aV_2 + g + b = aV_2 + I_1 (R_{e1} \cos\varphi + X_{e1} \sin\varphi) \quad (2.53)$$

$$V_1 - aV_2 = I_1 (R_{e1} \cos\varphi + X_{e1} \sin\varphi) \quad (2.54)$$

$$\varepsilon \approx I_1 (R_{e1} \cos\varphi + X_{e1} \sin\varphi) / V_1 \quad (2.55)$$

ويجدر بالملاحظة ان الشكل (2.18) والعلاقات السابقة تعكس حالة حمولة ذت معامل قدرة متأخر. ولذلك يجب في حالة الحمولة ذات معامل القدرة المتقدم قلب اشارة زاوية معامل القدرة $\cos\varphi$ ومن تم قلب اشارة المقدار $X_{e1} \sin\varphi$ في المعادلات (2.53) الى (2.55) الى اشارة سالبة.

وتبين المعادلة (2.55) ان تنظيم الجهد يعتمد على معامل قدرة الحمل حيث يتضح من الشكل (2.18) ان القيمة العظمى لتنظيم الجهد تحدث عندما ينطبق $I_1 Z_{e1}$ على aV_2 وتكون $(\theta - \varphi = 0)$. ويتطلب ذلك ان يكون معامل قدرة الحمولة متأخر وزاويته تساوي زاوية المعاوقة المكافئة.

8.2 - النظام الواحدي للقياس.

تجـرى تحلـيلات نظـم القـوى الكهربائيـة بمختلـف مكوناتهـا باستخدام النظام الواحدي للقياس حيث يتم التعبير عن الكميات المختلفة كنسب واحدية تستند لاسس محددة بدلاً من استخدام القيم الفعلية. ويميز هذا النظام انه يحصر ثوابت عناصر المنظومة ضمن نطاق ضيق ويغني عن تحويلها بين جانبي المحول. فاذا كانت K تمثل القيمة الفعلية للقدرة او الجهد او التيار او المعاوقة او اي كمية كهربائية، يمكن الحصول على قيمتها الواحدية K_{pu} استناداً الى القيمة الاساس K_{base} كما يلي:

$$K_{pu} = K / K_{base} \qquad (2.56)$$

وعند تحليل المنظومة يجب استخدام نفس الاساس لعناصرها، وقد يتطلب ذلك تغيير قيم واحدية مسندة لاسس مختلفة الى قيم مسندة لاساس مشترك. ويمكن تحويل القيمة الواحدية الاصلية K_{pu} المسندة للاساس K_{base} الى قيمة واحدية جديدة K'_{pu} مسندة لاساس جديدة K'_{base} كما يلي:

$$K'_{pu} = K_{pu} (K_{base} / K'_{base}) \qquad (2.57)$$

ويكفى عملياً تحديد القيم الاساس لأثنتين من كميات الدائرة (القدرة والجهد والتيار والمعاوقة) واشتقاق القيم الاساس للكميتين الاخريين منهما حيث يستخدم نفس الاساس للقدرات الفعالة والمتفاعلة. وقد جرى العرف على اختيار القيم الاساس للقدرة $P_{base} = Q_{base} = S_{base}$ والجهد V_{base} اولاً ومن تم تعيين القيم الاساس لكل من التيار والمعاوقة كما يلي:

$$I_{base} = S_{base} / V_{base} \qquad (2.58)$$

$$Z_{base} = V_{base} / I_{base} = V_{base}^2 / S_{base} \qquad (2.59)$$

وفي المحول تكون النسبة بين قيم الاساس للجهد على الجانبين مساوية لنسبة عدد اللفات وعادةً ماتستخدم مقننات القدرة والجهد كقيم اساس عند الجانبين. ومن الدائرة المكافئة المبسطة يمكن اثبات ان القيمة الواحدية للمعاوقة (المقاومة والمفاعلة) ستكون متساوية في الجانبين، كما يلي:

$$Z_{e1\text{-}pu} = Z_{e1} / Z_{base\text{-}1} = Z_{e1} / (V_{base\text{-}1}^{2} / S_{base}) \quad (2.60)$$

$$Z_{e2\text{-}pu} = Z_{e2} / Z_{base\text{-}2} = Z_{e2} / (V_{base\text{-}2}^{2} / S_{base}) \quad (2.61)$$

$$Z_{e2\text{-}pu} = (Z_{e1} / a^{2}) / [(V_{base\text{-}1} / a)^{2} / S_{base}] = Z_{e1\text{-}pu} \quad (2.62)$$

$$Z_{e2\text{-}pu} = Z_{e1\text{-}pu} = Z_{e\text{-}pu} \quad (2.63)$$

ويمكن اثبات ان القيم الواحدية للجهود والتيارات متساوية في جانبي المحول وذلك كما يلي:

$$V_{1\text{-}pu} = V_{1} / V_{base\text{-}1} = (aV_{2}) / (aV_{base\text{-}2})\square \quad (2.64)$$

$$I_{1\text{-}pu} = I_{1} / I_{base\text{-}1} = (I_{2}/a) / (I_{base\text{-}2}/a) \quad (2.65)$$

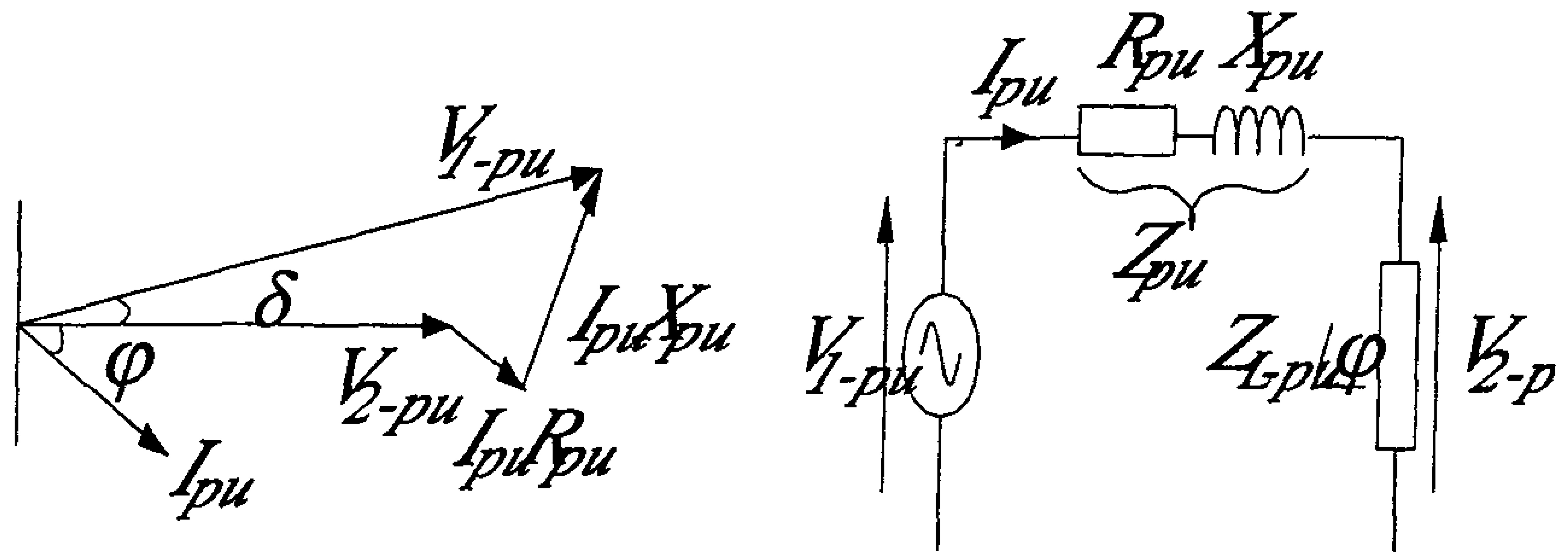
$$V_{1\text{-}pu} = V_{2\text{-}pu} = V_{pu} \;, \quad I_{1\text{-}pu} = I_{2\text{-}pu} = I_{pu} \quad (2.66)$$

وبالتعبير بالقيم الواحدية عن معادلة الجهد ومعاوقة الحمولة في الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (13)، يمكن الحصول على الدائرة المكافئة المبسطة الواحدية والمبينة في الشكل (20) كما يلي:

$$V_{1} = V'_{2} + I_{1}Z_{e1} \;, Z_{L\text{-}pu} = Z_{L} / Z_{base\text{-}2} = Z_{L}/(V_{base\text{-}2}^{2} / S_{base})$$

$$V_{1}/V_{base\text{-}1} = V'_{2}/V_{base\text{-}1} + I_{1}Z_{e1}/V_{base\text{-}1} = aV_{2}/aV_{base\text{-}2} + I_{1}Z_{e1}/(I_{base\text{-}1}Z_{base\text{-}1})$$

$$V_{1\text{-}pu} = V_{2\text{-}pu} + I_{1\text{-}pu} Z_{e\text{-}pu} \quad (2.67)$$



الشكل (20) الدائرة المكافئة المبسطة للمحول بالنظام الواحدي.

وعند استخدام القيم الواحدية يمكن وفقاً للعلاقات السابقة اثبات ان فقد النحاس عند الحمل المقنن $P_{c\text{-}pu}$ يساوي المقاومة المكافئة $R_{e\text{-}pu}$، وان فقد الحديد عند الجهد المقنن $P_{i\text{-}pu}$ سيكون مساوياً لمواصلة فقد الحديد $(G_{c\text{-}pu}=1/R_{c\text{-}pu})$ كما يلي:

$$P_{c\text{-}pu} = P_c/S_{base} = I_{base\text{-}1}^2 R_{e1}/S_{base} = R_{e1}/(V_{base\text{-}1}^2/S_{base}) = R_{e\text{-}pu} \qquad (2.68)$$

$$P_{i\text{-}pu}=P_i/S_{base}=(V_{base\text{-}1}^2/R_c)/S_{base}=(V_{base\text{-}1}^2/S_{base})/R_c= G_{c\text{-}pu} \qquad (2.69)$$

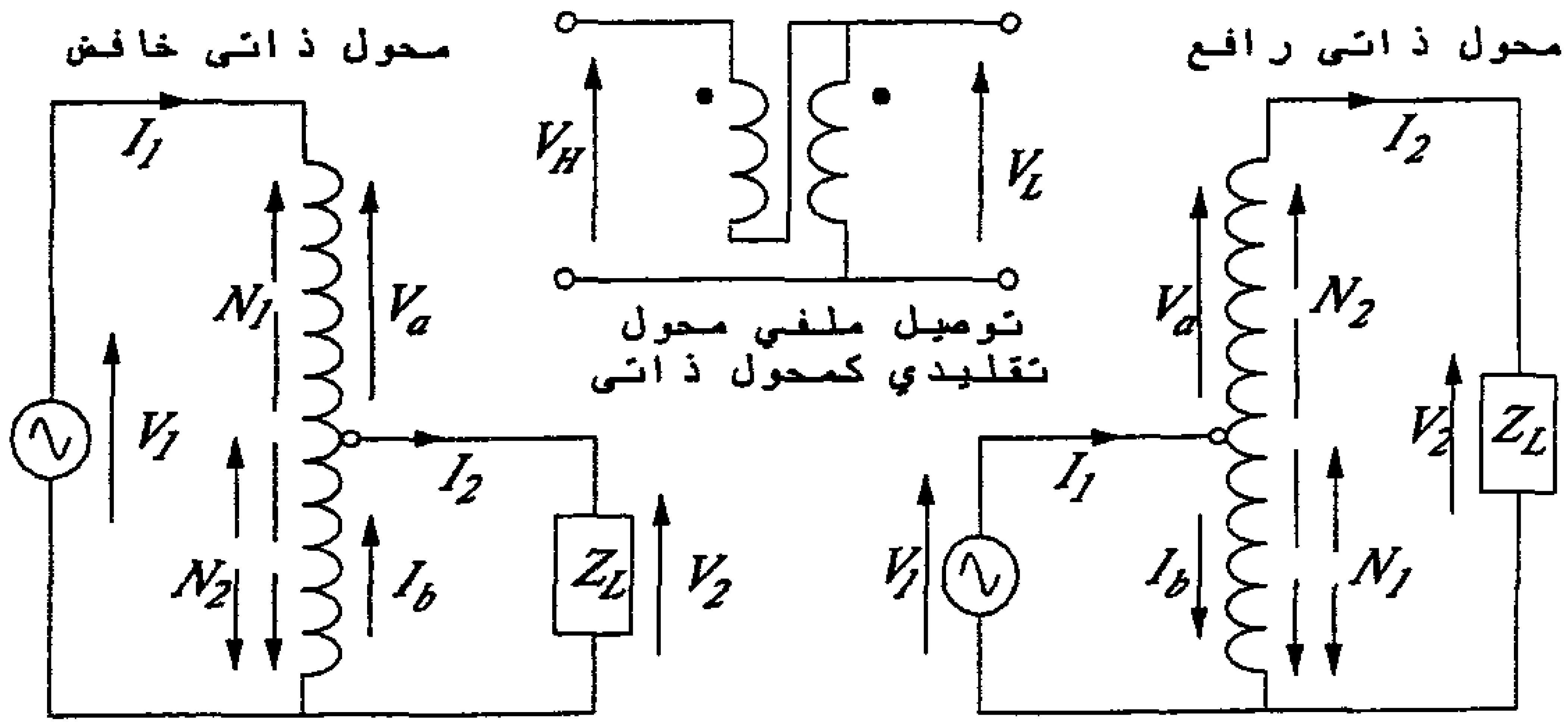
واذا كانت القيمة الواحدية لحمولة المحول S_{pu} ومعامل قدرتها $\cos\varphi$ يمكن باستخدام النظام الواحدي اثبات ان معادلات كفاءة وتنظيم جهد المحول ستصبح كما يلي:

$$\eta = S_{pu}\cos\varphi / (S_{pu}\cos\varphi + S_{pu}^2 P_{c\text{-}pu} + P_{i\text{-}pu}) \qquad (2.70)$$

$$\varepsilon = S_{pu}(R_{e\text{-}pu}\cos\varphi \pm X_{e\text{-}pu}\sin\varphi) \qquad (2.71)$$

9.2 - المحول الذاتي.

ينظر الى المحول تقليدياً على انه يتكون من ملفين او اكثر مقترنين مغناطيسياً ومعزولين كهربائيا، ولكن يمكن تحويل الجهد بكفاءة اعلى من غير اي نقص في القدرة المركبة بواسطة المحول الذاتي. ويعرف المحول الذاتي احادي الملف بأن كل من جانبيه الابتدائي والثانوي يشتركان في جزء منهما. وعليه فإن المحول التقليدي ذو الملفين يمكن اعتباره محولا ذاتيا اذا تم توصيل ملفيه على التوالي في قطبية طرحية لتصبح مشتركة في واحد منها كما هو مبين في الشكل (21).



الشكل (21) توصيلات المحول الذاتي.

ويجب ملاحظة ان المحول الذاتي وان كان يبدو كمجزئ الجهد الا انه يختلف عنه جوهرياً في ان التيار المار في الجزء المشترك يتدفق في اتجاه معاكس لما يجب ان يكون عليه في مجزئي الجهد. وبينما نجد في مجزئ الجهد ان التيار الداخل دائما اكبر من التيار الخارج نجد في المحول الذاتي ان تيار الجانب الاقل جهداً اكبر من تيار الجانب الاعلى جهداً لان تيار جانب الجهد المنخفض يساوي مجموع تيار جانب الجهد العالي وتيار الجزء المشترك.

وعادةً ما يستخدم المحول الذاتي كمنظم للجهد حيث يمكن بواسطته الحصول على جهد متغير يدوياً او آلياً باستخدام عدة نقاط توصيل على طول الملف. ويميز المحول الذاتي ان ق.د.م الناتجة عن مرور تيار جانب

الجهد الاقل في جزء الملف المشترك تعادل ق.د.م الناتجة عن مرور تيار جانب الجهد الاعلي في الملف كله. ولكون جانبيه يشتركان في جزء من ملفه يمتاز المحول الذاتي بالتوفير في كمية النحاس اللازمة للفه وتخفيض فقد النحاس ومن تم زيادة الكفاءة. وفي المقابل يعيب المحول الذاتي ما يلي:

1 - الاتصال الكهربائي المباشر بين الجانبين الابتدائي والثانوي.

2 - تساوي جهد الجانبين عند حدوث فتح في الجزء المشترك بينهما.

3 - ارتفاع تيار القصر مقارنةً بمستواه في المحول التقليدي ذو الملفين.

وكما هو الحال مع المحول التقليدي ذو الملفين يمكن التعبير عن ق.د.ك المتولدة في جانبي المحول الذاتي كما في المعادلتين (2.9) و (2.10). وبذلك نحصل بأهمال هبوط الجهد في معاوقة اللفائف على نسبة تحويل الجهود للمحول الذاتي المثالي كما يلي:

$$N_1 / N_2 = E_1 / E_2 = V_1 / V_2$$

$$V_1 / V_2 = N_1 / N_2 = a \qquad (2.72)$$

وباهمال تيار اللاحمل وكما هو الحال في المحول التقليدي ذي الملفين فإن ق.د.م الجانب الابتدائي I_1N_1 يجب ان تعادل ق.د.م الجانب الثانوي I_2N_2 للمحول الذاتي. وبذلك يمكن باهمال اشارة السالب في المعادلة (2.12) التعبير عن نسبة تحويل التيارات للمحول الذاتي المثالي كما يلي:

$$I_1N_1 = I_2N_2$$

$$I_2 / I_1 = N_1 / N_2 = a \qquad (2.73)$$

ويمكن بالنظر الى دائرة المحول الذاتي الخافض المبينة في الشكل (2.20) التعبير عن العلاقة بين جهود وتيارات جانبي المحول الذاتي الخافض

للجهد كما يلي (لاحظ ان I_b تمثل تيار الجزء المشترك و V_a تمثل جهد الجزء غير المشترك ببين جانبي المحول الذاتي):

$$V_1 = V_2 + V_a \qquad (2.74)$$

$$I_2 = I_1 + I_b \qquad (2.75)$$

ومن المعادلتين (2.72) و (2.74) وكذلك من المعادلتين (2.73) و (2.75) نجد ان:

$$(V_2 + V_a) / V_2 = a \qquad (2.76)$$

$$(I_1 + I_b) / I_1 = a \qquad (2.77)$$

$$a = 1 + V_a / V_2$$

$$a = 1 + I_b / I_1$$

$$a = 1 + a' \qquad (2.78)$$

حيث تمثل a' نسبة التحويل او نسبة عدد اللفات لمحول تقليدي مماثل تم توصيل ملفيه على التوالي في قطبية طرحية لتكوين محول ذاتي خافض للجهد. وعند نفس التيارات والجهود للملفين نجد ان كمية النحاس المستخدمة في صنع ملف المحول تتناسب طرديا مع كل من مساحة مقطع سلك الملف (الذي يتناسب مع تيار الملف)، وطول السلك (الذي يتناسب مع عدد لفات الملف). وبهذا تتناسب كمية النحاس المستخدمة في الملف مع مجموع حاصل ضرب تياره في عدد لفاته I N.

ونظرا لان التيار المار في لفات الجانب الثانوي (والتي تمثل كذلك جزء من لفات الجانب الابتدائي) اقل من تيار الحمولة يمكن استخدام سلك تكون مساحة مقطعه اصغر مما يقتضيه تيار الحمولة لصنع لفات الجانب الثانوي. وينتج عن ذلك توفير في كمية النحاس المستخدمة في المحول الذاتي مقارنة بالمحول التقليدي ذو الملفين المكافئ له (اي الذي له نفس مقننات

الجهود والتيارات والقدرة). واذا كانت كمية النحاس المستخدمة في محول ذاتي تم تكوينه بتوصيل ملفي محول تقليدي على التوالي في قطبية طرحية W_{at} وكمية النحاس المستخدمة في المحول التقليدي الاصلي W_{2w} نجد ان:

$$\frac{W_{at}}{W_{2w}}=\frac{I_1(N_1-N_2)+N_2(I_2-I_1)}{I_1N_1+I_2N_2} \qquad (2.79)$$

$$=\frac{N_1/N_2-1+I_2/I_1-1}{N_1/N_2+I_2/I_1}=\frac{a-1}{a} \qquad (2.80)$$

وفي المحول الذاتي لاتنقل كل القدرة بين الجانبين الابتدائي والثانوي بواسطة المجال المغناطيسي كما هو الحال في المحول التقليدي وانما ينقل جزء منها S' بالتوصيل المباشر بين الملفين بينما ينقل الجزء الآخر S'' بينهما بالتحويل وبواسطة المجال المغناطيسي. وباهمال معاوقة الملفين يمكن مقارنة مقنن قدرة المحول الذاتي S_{at} مع مقنن قدرة المحول التقليدي S_{2w} المكون له كما يلي:

$$S_{at} = S'+ S''= V_2\, I_2 = V_2\, (I_1+I_b) \qquad (2.81)$$

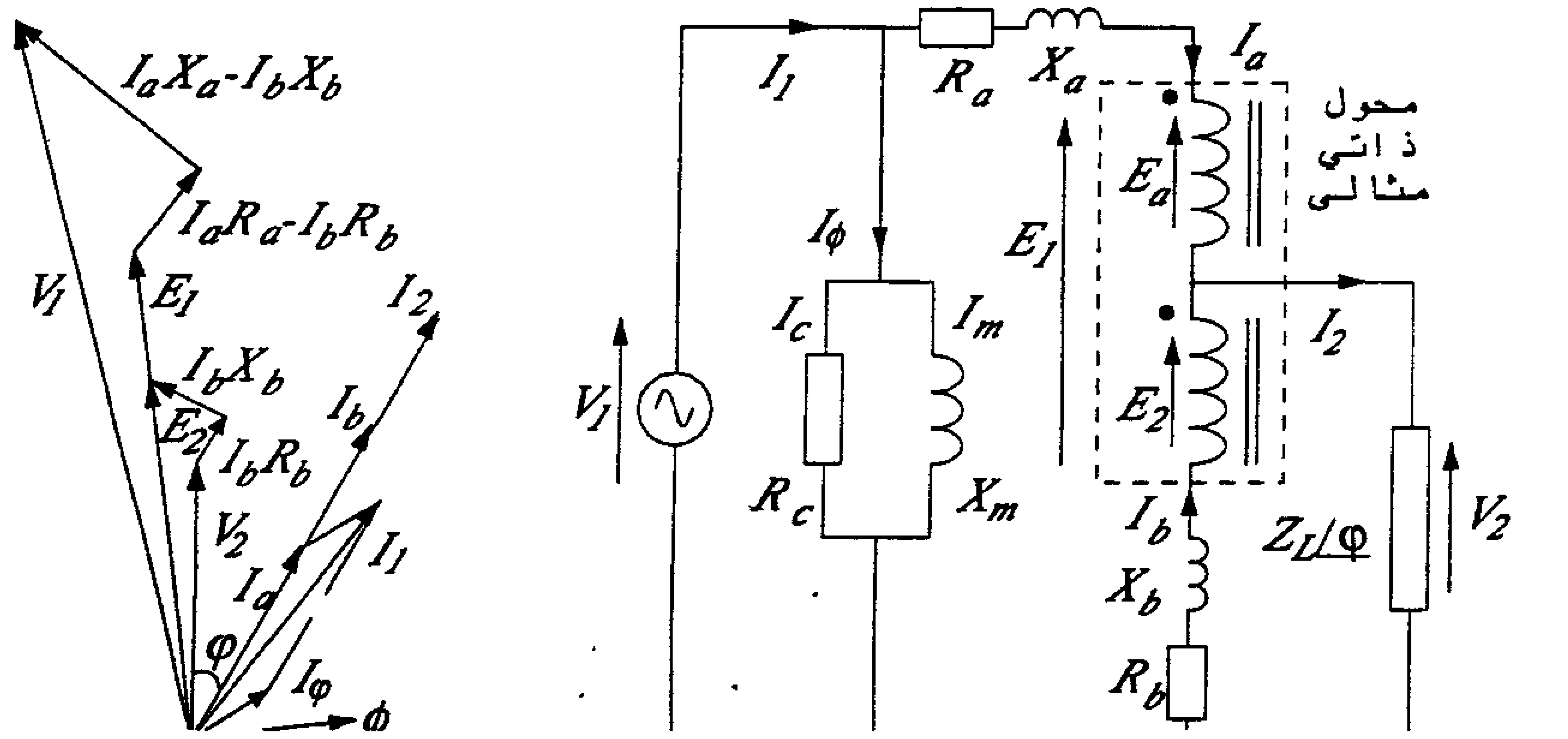
$$S'= V_2\, I_1\ ,\ S''= V_2\, I_b$$

$$S_{2w} = V_2\, I_b = V_2\, (I_2-I_1) \qquad (2.82)$$

$$\frac{S_{at}}{S_{2w}}=\frac{V_2I_2}{V_2(I_2-I_1)}=\frac{a}{a-1} \qquad (2.83)$$

1.9.2. – نمذجة المحول الذاتي.

يمكن رسم الدائرة المكافئة التقريبية للمحول الذاتي ومخططها الطوري كما في الشكل (2.21). وباهمال تيار الاثارة في هذه المرحلة سيمثل I_a تيار الابتدائي I_1 في المعادلات (2.73) و (2.77). واذا كان معامل قدرة الحمولة متأخر وزاويته φ يمكن باتباع نفس طريقة اشتقاق المعادلة (2.53) من الشكل (2.18) لتنظيم الجهد، التعبير تقريبياً عن V_1 من الشكل (22) كما يلي:



الشكل (22) الدائرة المكافئة التقريبية للمحول الذاتي.

$$E_1 = aE_2 \;,\; (I_a+I_b)/I_a = a \;\rightarrow\; I_b = (a\text{-}1)I_a \qquad (2.84)$$

$$E_2 \approx V_2 + I_b\,(R_b \cos\varphi + X_b \sin\varphi) \;, \qquad E_1 = aE_2 \qquad (2.85)$$

$$V_1 \approx E_1 + (I_aR_a - I_bR_b)\cos\varphi + (I_aX_a - I_bX_b)\sin\varphi \qquad (2.86)$$

$$V_1 = aV_2 + aI_b\,(R_b \cos\varphi + X_b \sin\varphi) + (I_aR_a - I_bR_b)\cos\varphi + (I_aX_a - I_bX_b)\sin\varphi$$

$$= aV_2 + I_b(R_b\cos\varphi + X_b \sin\varphi)\,(a\text{-}1) + I_a\,(R_a \cos\varphi + X_a \sin\varphi)$$

$$= aV_2 + I_a(R_b \cos\varphi + X_b \sin\varphi)\,(a\text{-}1)^2 + I_a\,(R_a \cos\varphi + X_a \sin\varphi)$$

وبذلك يمكن التعبير عن جهد الابتدائي V1 للمحول الذاتي بدلالة زاوية معامل قدرة الحمولة وتيار الحمولة منسوب الى الابتدائي I_a وكذلك المعاوقة المكافئة كما يلي:

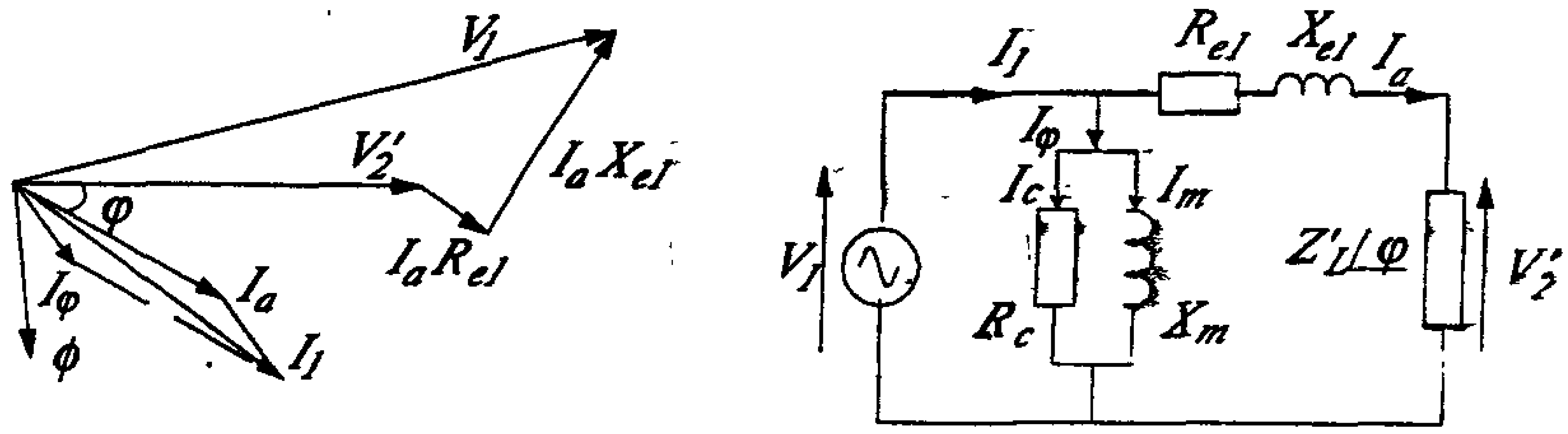
$$V_1 = aV_2 + I_a\,(R_{e1} \cos\varphi + X_{e1} \sin\varphi) \qquad (2.87)$$

$$R_{e1} = R_a + R'_b \;, \qquad X_{e1} = X_a + X'_b$$

$$R'_b = R_b\,(a\text{-}1)^2 \;, \qquad X'_b = X_b\,(a\text{-}1)^2 \qquad (2.88)$$

حيث تمثل R_{e1} و X_{e1} المقاومة والمفاعلة المكافئتين للمحول الذاتي منسوبتين الى الملف الابتدائي وهما يناظران مثيلاتهما في المحول التقليدي ذو الملفين. وبالمقارنة بين المعادلتين (2.15) و (2.88) يتضح ان العلاقة بين نسبة التحويل للمحول الذاتي a ونسبة التحويل للمحول ذو الملفين المناظر a' هي $a' = a - 1$ او $a = 1 + a'$ وكما سبق اثباتة في المعادلة (2.78).

وبذلك يمكن من المعادلات (2.84) و (2.87) وباضافة فرع وتيار المغنطة رسم الدائرة المكافئة التقريبية للمحول الذاتي منسوبة للابتدائي وكذلك مخططها الطوري كما في الشكل (23) حيث R_c و X_m يمثلان مقاومة فقد الحديد ومفاعلة المغنطة.



الشكل (23) الدائرة المكافئة التقريبية للمحول الذاتي منسوبة للابتدائي.

وهنا كذلك يمكن الحصول على قيم ثوابت فرع المغنطة R_c و X_m من اختبار اللاحمل الاعتيادي للمحول الذاتي كما في المحول ذو الملفين. كما يمكن الحصول على قيم R_{e1} و X_{e1} من اختبار القصر الاعتيادي كما في المحول ذو الملفين.

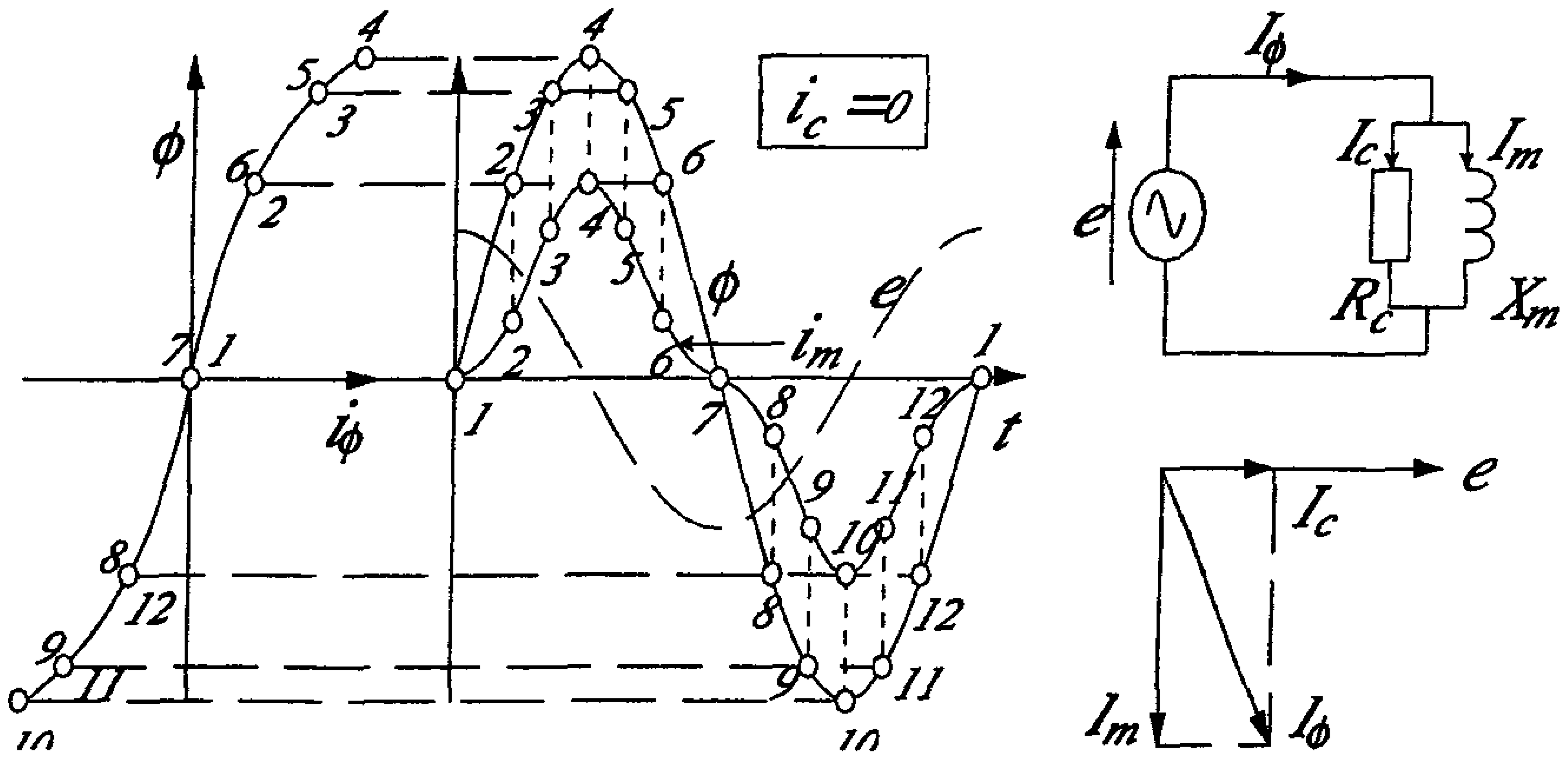
ويجدر بالملاحظة ان المزايا الاقتصادية للمحول الذاتي تزداد باقتراب نسبة تحويله من الواحد. فاذا كانت a=1 سيكون المحول الذاتي مثالي ذو تنظيم جهد صفر وفقد النحاس مهمل ولايعيبه سوى تيار الاثارة، وليمثل مفاعل بسيط يمكن استخدامه متفرعاً في انظمة نقل القدرة. كما يستخدم المحول الذاتي لبدء تشغيل المحركات الحثية بجهد مخفّض وللحصول على

جهد متغير بتغيير نسبة تحويله. وكلما كانت $a \le 3$ يكون حجم وفقد وتنظيم المحول الذاتي اقل بكثير من المحول ذو الملفين المناظر.

10.2 - توافقيات تيار الاثارة.

يؤدي تسليط جهد جيبي على ابتدائي المحول عند اللاحمل الى تدفق تيار اثارة ينشئ فيض جيبي في اللب. وقد افترض فيما سبق ان هذا التيار جيبي لافتراض خطية الخصائص المغناطيسية للب. وحتى مع كون الشكل الموجي للجهد جيباً فإن الشكل الموجي لتيار الاثارة لن يكون في الواقع جيبياً بسبب لاخطية العلاقة بين كثافة الفيض والاجهاد المغناطيسي والناتجة عن ظاهرتي التشبع والتخلف المغناطيسي. وتزيد كثافة الفيض العالية التي تفرضها متطلبات التصميم، المتمثلة في تحقيق اكبر قدرة بأقل حجم للب، من مستوى التشبع وبالتالي تزيد من لاجيبية تيار الاثارة في المحول.

ويضم تيار الاثارة i_ϕ مركبين متعامدتين هما تيار المغنطة الحثي i_m وتيار فقد اللب الاومي i_c. ويمكن دراسة تأثير لاخطية علاقة B-H على الشكل الموجي للتيار باعادة رسمها كعلاقة بين الفيض $(\phi=BA)$ وتيار الاثارة $(i_\phi=Hl/N)$ مما يبقيها بنفس الشكل ولكن بمقياس مختلف. وفي حالة أهمال فقد اللب وتياره i_c ومن تم اهمال دارة التخلف المغناطيسي سيمثل علاقة ϕ-i منحنى التشبع فقط. ويتتبع القيم اللحظية للفيض ϕ على الموجة الجيبية وما يناظرها على منحنى ϕ-i ثم تحديد تيار الاثارة المناظر على منحنى ϕ-i يمكن رسم موجة تيار الاثارة كما في الشكل (24).



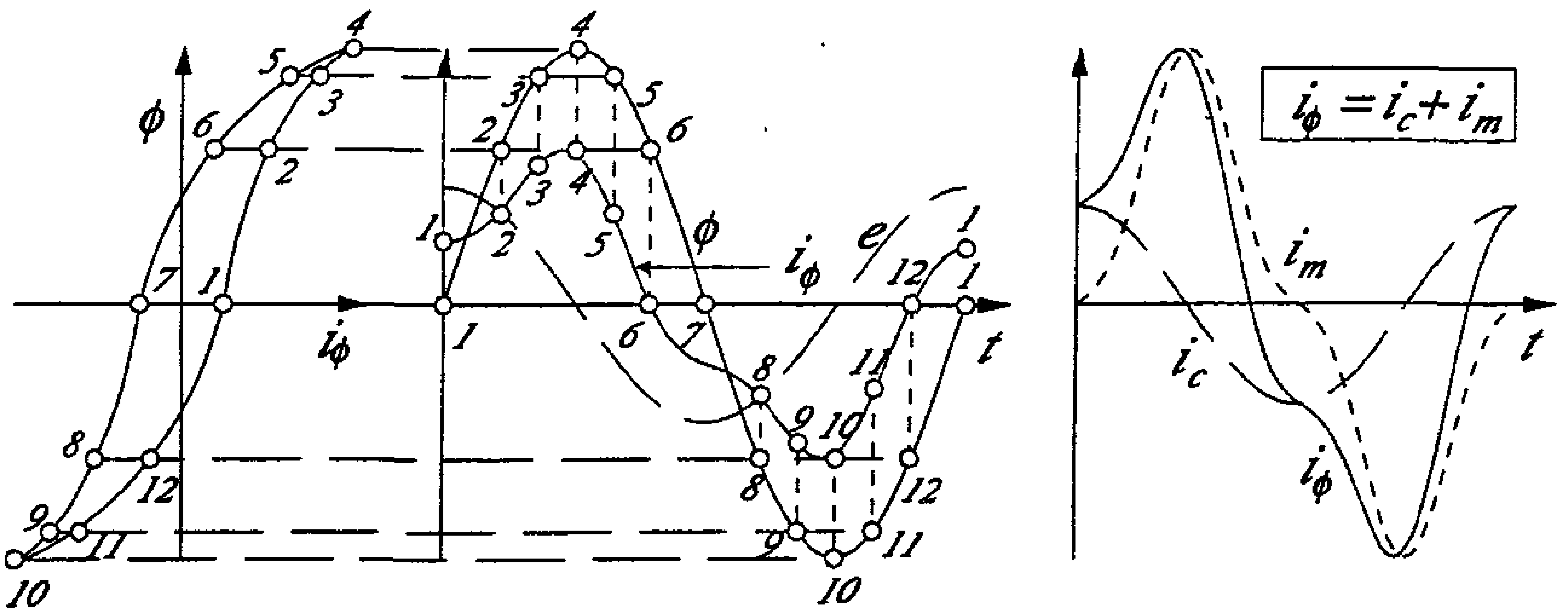
الشكل (24) موجة تيار الاثارة عند اهمال فقد اللب.

ويتضح من الشكل (24) ان الشكل الموجي لتيار الاثارة ليس جيبياً ولكنه متناسقاً بالنسبة للجهد وتتأخر مركبته الاساسية عن الجهد 90°. وفي هذه الحالة تكون القدرة ($VI.cos\varphi$) المسحوبة من المصدر صفراً وكما هو متوقع لكون فقد اللب ودارة التخلف قد تم اهمالهما، كما ان تيار الاثارة يكون حثي نقي ويساوي تيار المغنطة فقط (i_C=0) وكما هومبين في الشكل (24).

وفي حالة اخذ فقد اللب في الاعتبار سيمثل علاقة ϕ-i دارة التخلف المغناطيسي ويمكن بالمثل تتبع القيم اللحظية للفيض ϕ على الموجة الجيبية وما يناظرها على دارة ϕ-i وتحديد تيار الاثارة المناظر على دارة ϕ-i ورسم موجة تيار الاثارة كما في الشكل (25). وهنا يتضح ان الشكل الموجي لتيار الاثارة ليس جيبياً ولا متناسقاً بالنسبة للجهد (وان كانت متناسقاً بالنسبة للزمن) مما يجعل الازاحة الطورية بين مركبته الاساسية والجهد اقل من 90° بفارق يمثل زاوية معامل قدرة فقد اللب.

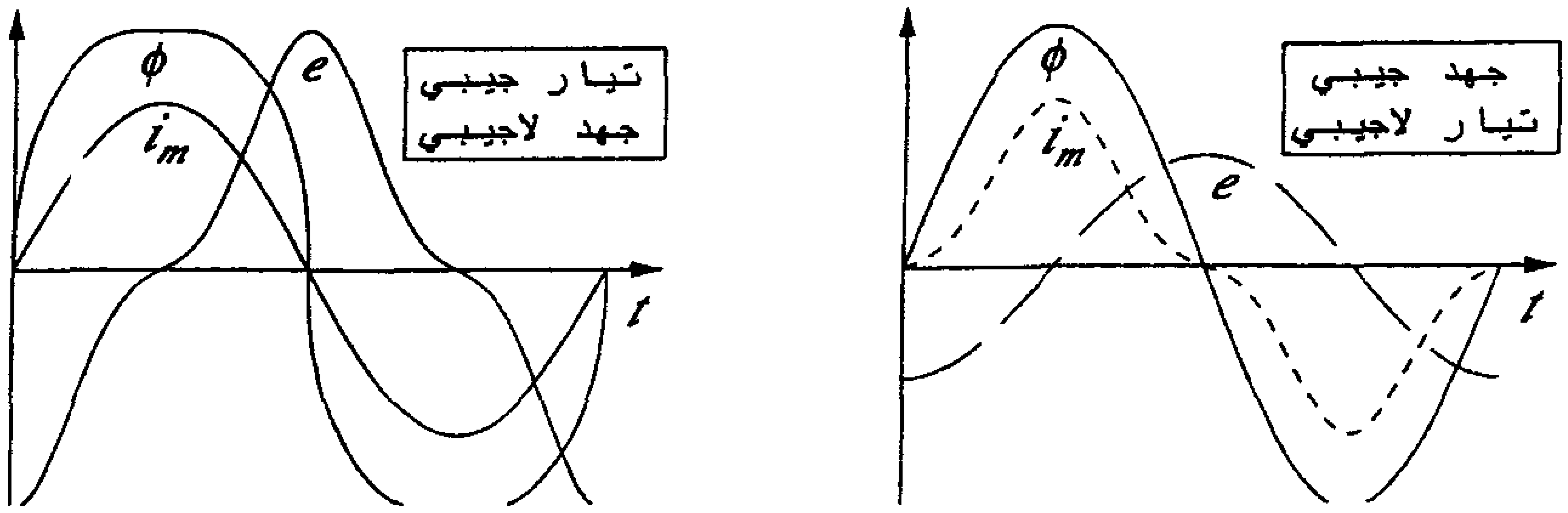
وبذلك يمكن فصل تيار الاثارة المبين في الشكل (25) الى مركبة تيار المغنطة اللاجيبي i_m والذي تتطبق مركبته الاساسية طورياً على موجة

الفيض ومركبة تيار الفقد i_c الجيبية والمنطبقة طورياً على الجهد. وطبقاً لتحليلات فورير فإن موجة تيار المغنطة المبينة في الشكل (25) تضم بالاضافة الى المركبة الاساسية ذات التردد الاساسي مركبات توافقيات فردية تغلب عليها مركبة التوافقية الثالثة مع مساهمات اقل لمركبات التوافقيات الخامسة والسابعة ومساهمات مهملة للتوافقيات الاعلى.



الشكل (25) موجي تيار الاثارة بدون اهمال فقد اللب.

وكما يتطلب الفيض الجيبي تيار مغنطة لاجيبي يضم توافقيات فردية يمكن من الشكل (25) وبنفس الكيفية اثبات ان تغذية المحول بتيار مغنطة جيبي سيؤدي الى انشاء فيض لاجيبي مسطح يضم مركبات توافقيات فردية كما في الشكل (26). ولكون ق.د.ك المحتثة تتناسب مع تفاضل الفيض فإن ق.د.ك المحتثة ستكون لاجيبية تضم توافقيات فردية مضاعفة حيث قيمة توافقية ق.د.ك الثالثة ثلاثة اضعاف نظيرتها للفيض وقيمة توافقية ق.د.ك الخامسة خمسة اضعاف نظيرتها للفيض وهكذا. وبذلك تكون موجة ق.د.ك حادة تبرز فيها التوافقية الثالثة وهي اكثر تشوه من من موجة الفيض المسطحة. وبأهمال فقد اللب سيتبين ذلك من دالتي ق.د.ك والفيض كما يلي:



الشكل (26) توافقيات ق.د.ك والفيض وتيار الاثارة.

$$\phi = \phi_1 \sin\omega t + \phi_3 \sin 3\omega t + \phi_5 \sin 5\omega t + \phi_7 \sin 7\omega t + \ldots \quad (2.89)$$

$$e = N_1 d\phi/dt = \omega N_1 (\phi_1 \cos\omega t + 3\phi_3 \cos 3\omega t + 5\phi_5 \cos 5\omega t + \ldots \quad (2.90)$$

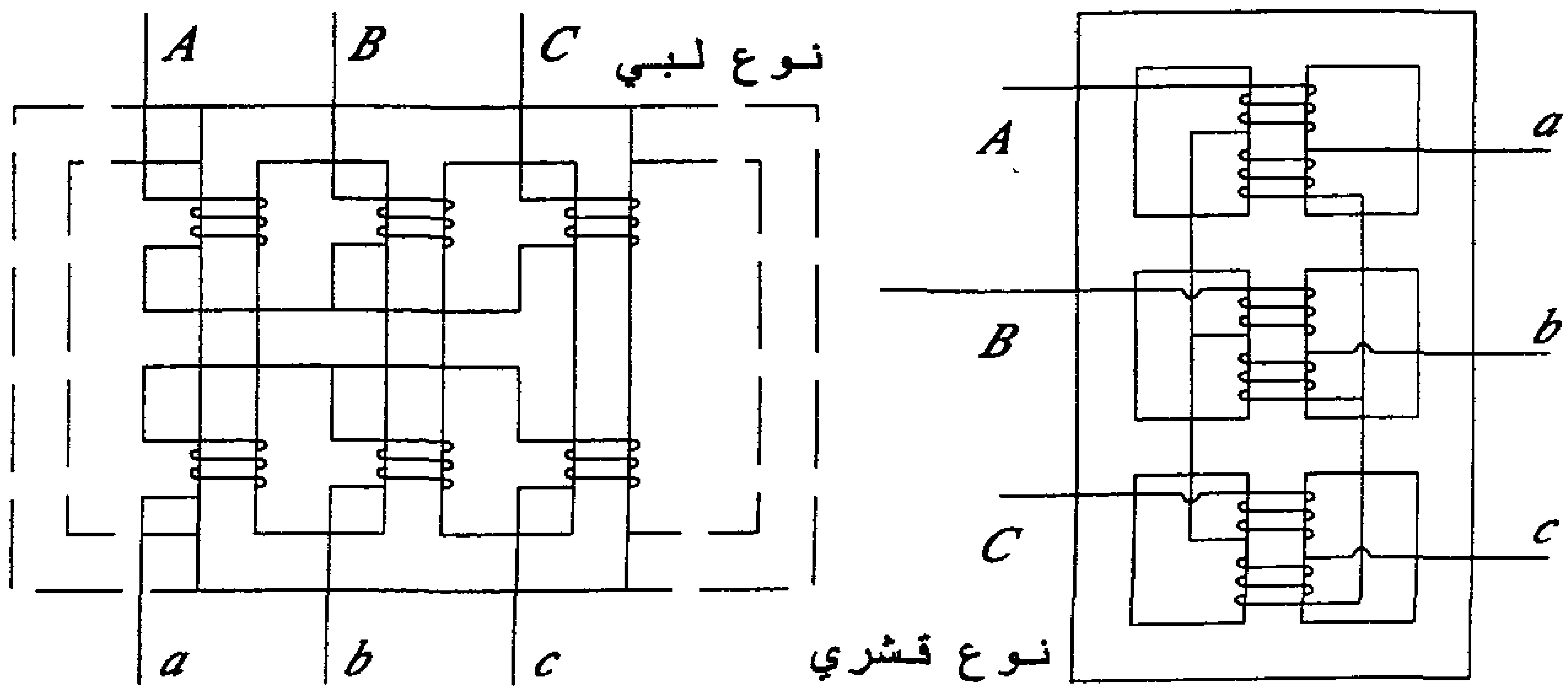
وبصفة عامة لن يتمكن الجهد الجيبي للمصدر من تغذية تيار التوافقية الثالثة مباشرةً ويجب في الحالة المثالية ان تكون معاوقته لتيار التوافقية الثالثة صفراً. ويعني ذلك بشكل ضمني ان تدفق تيار التوافقية الثالثة في معاوقة التوافقية الثالثة للمحول والشبكات المتصلة به يؤدي الى وجود مركبة توافقية ثالثة في ق.د.ك الجانب الابتدائي للمحول. وسيعمل ذلك على جعل موجة الفيض اكثر جيبية، وهو ما يحد من توافقيات تيار المغنطة نتيجةً للتشوه البسيط في دالة الفيض.

واذا كانت معاوقة التوافقية لمصدر وشبكة التغذية مهملة سيؤدي ذلك الى استهلاك ق.د.ك التوافقية الثالثة بالكامل في دفع تيار التوافقية الثالثة في معاوقة التوافقية الثالثة للمحول ولن تظهر مركبة التوافقية الثالثة في جهد المصدر. وفي المقابل سيؤدي كبر معاوقة التوافقية الثالثة لمصدر وشبكة التغذية الى تشوه الشكل الموجي لجهد التغذية بمركبة التوافقية الثالثة، وبالمثل للتوافقيات الاعلى.

ولتبسيط دراسة المحولات جرى العرف على اهمال لاخطية علاقة B-H وكافة توافقيات تيار الاثارة الذي تمثله المركبة الاساسية في مخطط متجهات الدوائر المكافئة للمحول في الحالات الاعتيادية. وتعتبر تيارات التوافقية الثالثة من العوامل المهمة التي تؤخذ في الحسبان عند تصميم وتوصيل المحول. وتتمثل مضار تيار التوافقية الثالثة في زيادة الفقودات والتداخل الكهرومغناطيسي مع دوائر الاتصالات، بينما يؤدي جهد التوافقية الثالثة الى زيادة اجهاد العوازل واحداث الرنين بين محاثة المحول ومتسعات الخطوط عند تردد التوافقية الثالثة والتداخل الكهروستاتيكي مع دوائر الاتصالات.

11.2. - المحولات ثلاثية الطور.

تستخدم المحولات ثلاثية الطور في تحويل مستوى الجهود ثلاثية الطور في منظومات القوى الكهربائية. ويمكن ان يكون لب المحول ثلاثي الطور من النوع القشري او من النوع اللبي حيث يتكون اللب في النوع الاخير من ثلاثة او خمسة سيقان كما هو مبين في الشكل (27). ويحتوي المحول على ثلاثة لفائف في كل من جانبي الجهد العالي والمنخفض حيث ترتب لفائف كل طور على ساق واحدة كما في المحول احادي الطور.



الشكل (27) بنية المحول ثلاثي الطور.

ويسمى المحول ثلاثي الطور المبين في الشكل (27) وحيث تلف لفائف لاطوار الثلاثة على لب مشترك بوحدة المحول ثلاثي الطور. ويمكن ان يتم تكوين المحول ثلاثي الطور باستخدام ثلاثة محولات احادية الطور يتم توصيل اطرافها بشكل مناسب فيما يعرف بمصرف المحولات. وللمقارنة بين محول الوحدة ثلاثي الطور ومصرف المحولات احادية الطور يمكن تلخيص المزايا الاساسية لكل منهما في النقاط التالية:

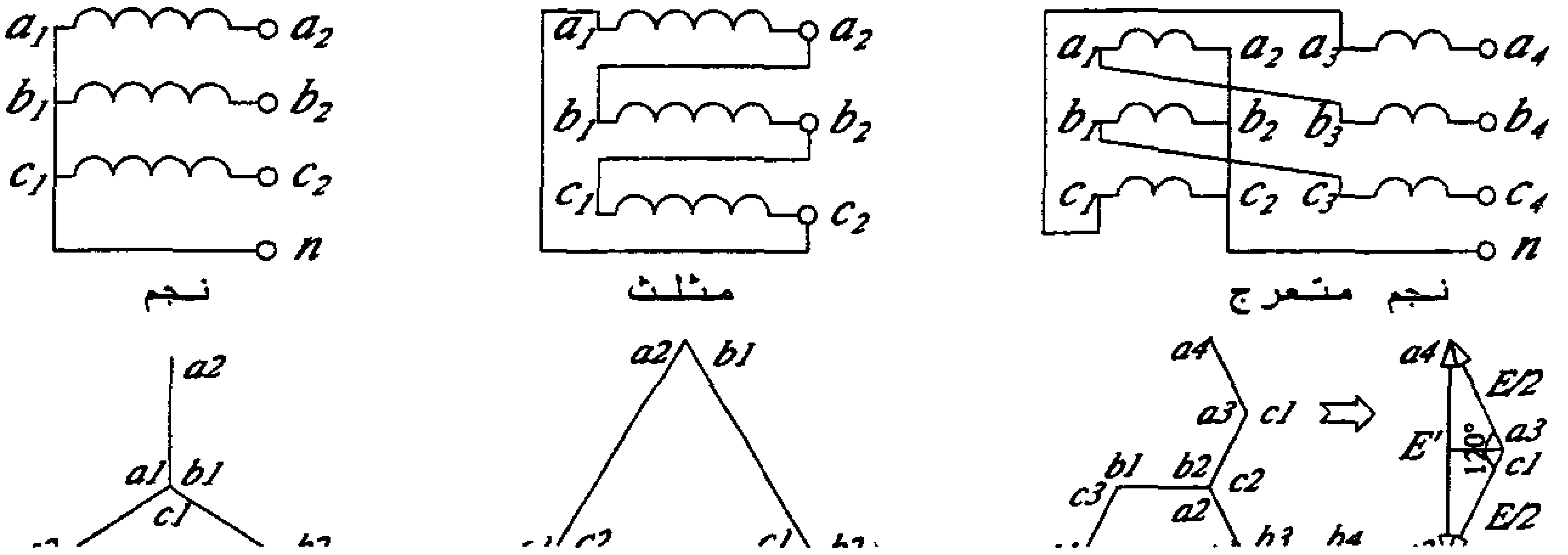
1 - يكفى لمصرف المحولات توفر محول واحد احادي الطور احتياطي لاحلاله محل الوحدة العاطلة.

2 - يمكن لمصرف المحولات مواصلة تغذية 57.7% من حمله التام بمحولين فقط عند خروج الثالث.

3 - يعد محول الوحدة ثلاثي الطور اقل تكلفة ويحتل حيز اقل لنصبه ولكنه مكلّف للنقل والمناولة.

4 - يعد محول الوحدة ثلاثي الطور اعلى كفاءة بقليل لكون الفقد في الحديد فيه اصغر قليلاً.

ويمكن توصيل لفائف أي من جانبي المحول ثلاثي الطور على هيئة مثلث او نجم او نجم متعرج بتوصيل نهايات لفائف الاطوار a و b و c كما في الشكل (28). وتتكون لفائف طور النجم المتعرج من نصفين ملفوفين على ساقين مختلفين ويتم توصيلهما متعاكسين على التوالي لتكون ق.د.ك النصفين متساوية وبينهما ازاحة 120°. واذا كانت E' محصلة ق.د.ك النصفين و E مجموعهما الجبري تكون $E'=0.866E$، أي ان جهد طور النجم المتعرج يبلغ 86.6% من جهد النجم المكافئ. وبما ان عدد اللفات يتناسب مع ق.د.ك تكون $N=1/0.866N'=1.55N'$، أي ان مجموع عدد لفات النصفين N يزيد 15.5% عن عدد اللفات N' المطلوب في النجم المكافئ.



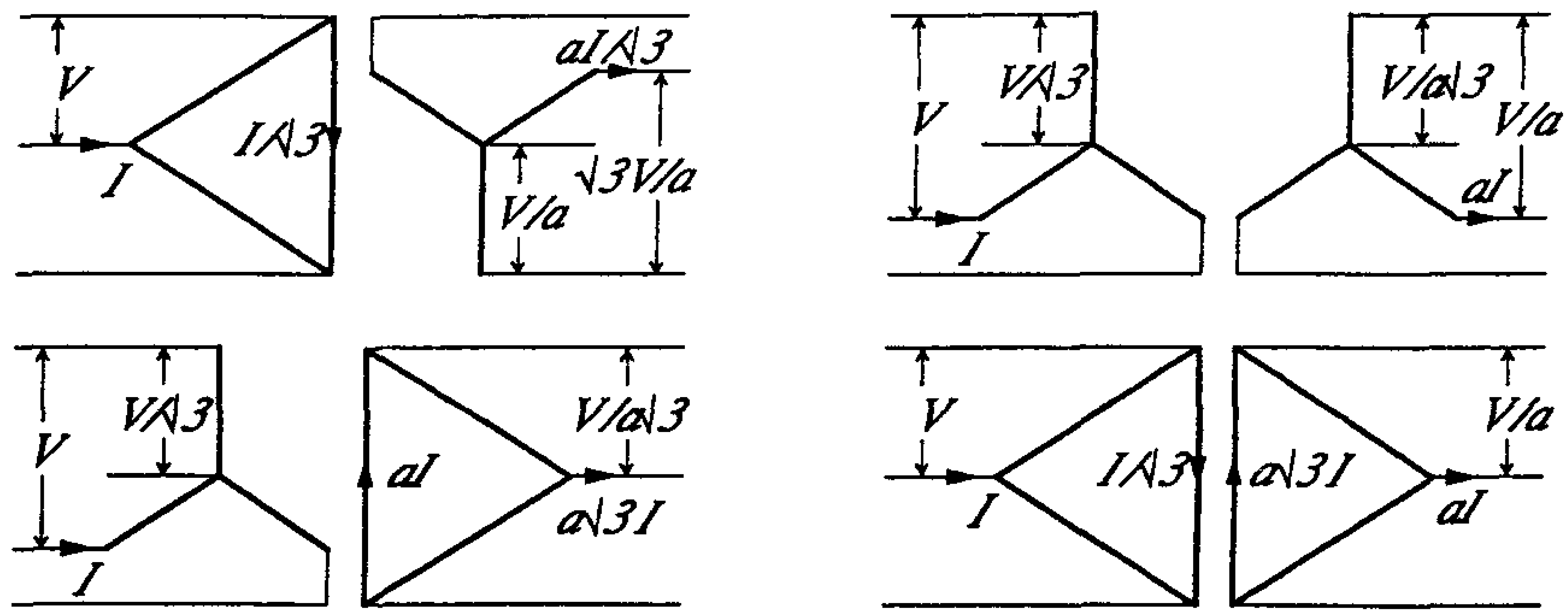
الشكل (28) توصيل نهايات ملفات الاطوار للتوصيلات المختلفة.

وعند تماثل لفائف الاطوار وتوازن جهود المصدر ومعاوقة الحمولة تكون جهود وتيارات الاطوار الثلاثة متزنة ويكفي لدراسة اداء المحول ثلاثي الطور تمثيله بمحول احادي الطور وتطبيق نظريات المحول احادي الطور. ويجب عند التعامل مع النموذج احادي الطور التأكد من استخدام كميات الطور وليس كميات الخط وتحويل النتائج الى كميات ثلاثية الطور مع مراعات قوانين التحويل بين قيم الخط والطور وفقاً لتوصيلة اللفائف وطرق تحليل الدوائر ثلاثية الطور.

ويلاحظ في النظام ثلاثي الطور المتزن ان جهود الاطوار متساوية وبين جهود كل طورين ازاحة طورية $120°$ ، وكذلك الحال لجهود الخطوط والتي توجد ازاحة $30°$ بينها وبين جهود الاطوار. وبتسليط جهود متزنة على لفائف الابتدائي فإن الفيوض المغناطيسية الناشئة في سيقان اللب للاطوار الثلاثة ومن تم ق.د.ك الطورية المحثة في الملفات الثانوية التي تشبكها تكون متزنة بنفس الكيفية. ومن المهم ملاحظة ان نسبة عدد اللفات تعكس نسب تحويل كميات الطور وليس الخط.

وتعتمد نسبة تحويل جهد وتيار الخط على توصيلة لفائف جانبي المحول ثلاثي الطور حيث يلاحظ في المثلث ان تيار الخط $\sqrt{3}$ ضرب تيار الطور وجهود الخطوط والاطوار متساوية ، وفي النجم او النجم المتعرج يكون جهد الخط $\sqrt{3}$ ضرب جهد الطور وتيارات الخطوط والاطوار متساوية. ويبين

الشكل (29) العلاقة بين كميات الخط والطور ونسبة عدد اللفات a لتوصيلات المثلث والنجم المختلفة لجانبي المحول. وينطبق على توصيلة النجم المتعرج نفس علاقات النجم مع مراعاة ان نسبة عدد اللفات تشير الى المجموع الجبري لجهد نصفي لفائف الطور وليس محصلتهما.



الشكل (29) علاقات القيم الطورية والخطية للمحول ثلاثي الطور.

وكما في المحول احادي الطور يمكن تطبيق النظام الواحدي للقياس عند التعامل مع النموذج احادي الطور للدائرة المكافئة للمحول ثلاثي الطور حيث يتم تحديد اسس القدرة المركبة والجهد. ويتم اشتقاق اسس التيار والمعاوقة باستخدام التحويلات المعتمدة بين قيم الطور والخط لهيئة النجم القياسية مع مراعاة ان القدرة ثلاثية الطور تساوي ثلاثة اضعاف قدرة الطور الواحد.

وقد جرى العرف في هذه الحالة على استخدام الكميات ثلاثية الطور للاسس الاولية للقدرة المركبة والجهد. وباستخدام الادلة السفلية 1ϕ و 3ϕ لتمييز الكميات احادية وثلاثية الطور على الترتيب، واستخدام الادلة السفلية p و L لتمييز كميات الطور والخط على الترتيب، يمكن التعبير عن الاسس احادية وثلاثية الطور للقدرة والجهد والتيار والمعاوقة كما يلي:

$$S_{3\phi}= 3S_{1\phi}, \quad V_L= \sqrt{3}\, V_p, \quad I_L= I_p= I$$

$$I_{base}= S_{base1\phi}/V_{p\text{-}base}= S_{base3\phi}/\sqrt{3}\, V_{L\text{-}base} \qquad (2.91)$$

$$Z_{base} = V_{p\text{-}base}^2 / S_{base1\phi} = V_{L\text{-}base}^2 / S_{base3\phi} \quad (2.92)$$

2.11.2 – التوافقيات الثالثة في المحولات ثلاثية الطور.

يتطلب تدفق تيار التوافقية الثالثة في معاوقة التوافقية الثالثة للمحول والشبكات المتصلة وجود مركبة توافقية ثالثة في ق.د.ك المحول وهو ما يجعل الشكل الموجي للفيض وسط بين الجيبي والحاد. ويمكن اهمال تشوه الشكل الموجي لجهد التغذية نتيجةً لهبوط الجهد في معاوقة التوافقية الثالثة اذا كانت المعاوقة صغيرة، ولكن مركبة التوافقية الثالثة لابد ان تظهر في تيار الاثارة او ق.د.ك المحول. ولدراسة التوافقيات الثالثة في المحول ثلاثي الطور ذو التغذية والحمولة المتزنة يجب مراعات ما يلي:

1 – تكون الازاحة 120° فقط فيما بين متجهات المركبة الاساسية والتوافقيات ذات الرتبة (6n±1) للكميات الطورية، حيث n أي عدد صحيح. وتكون الازاحة ±3x120°=0° بين متجهات مركبة التوافقية الثالثة ومضاعفاتها (3n) والتي تكون بالتالي منطبقة طورياً في الاطوار الثلاثة.

2 - اذا لم يتمكن تيار التوافقية الثالثة من التدفق في الجانب الابتدائي سيتم تحويله حثياً الى الجانب الثانوي اذا كان يسمح بتدفقه. واذا كانت توصيلة كلا الجانبين تسمح بتدفق تيار التوافقية الثالثة فإنه يتوزع بينهما بما يتناسب عكسياً مع معاوقة التوافقية الثالثة في كل منهما.

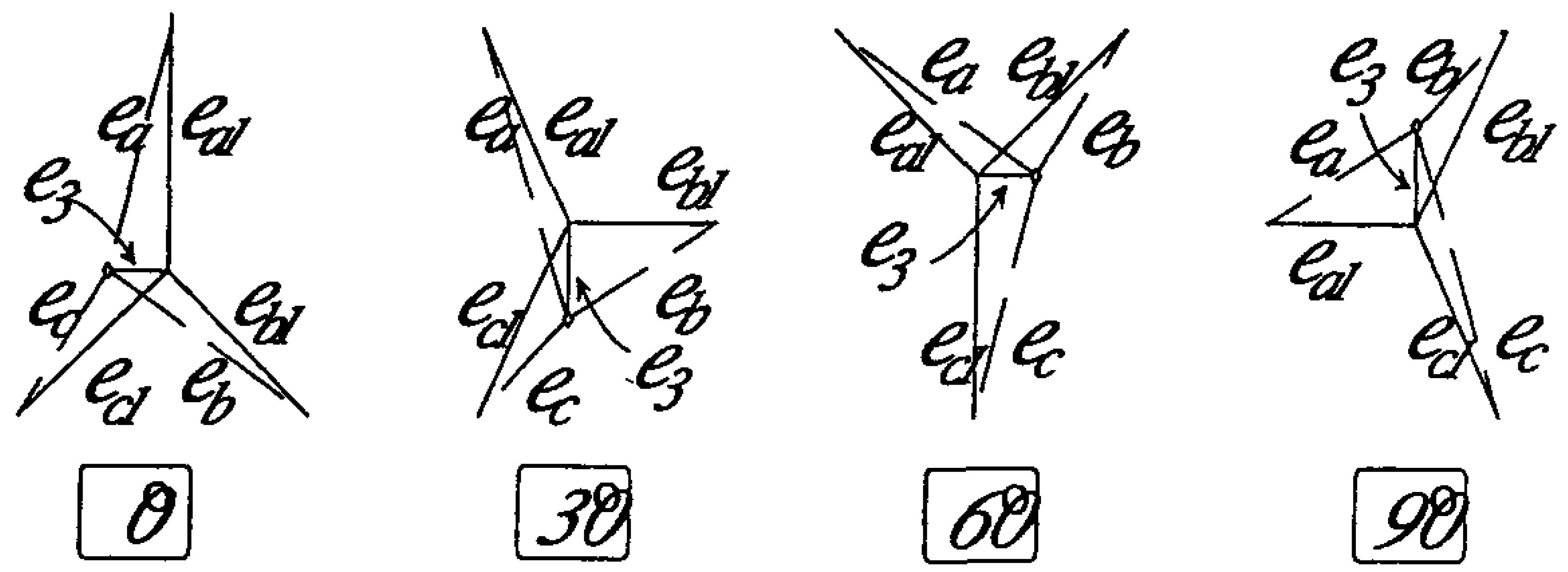
3 - في توصيلة المثلث تكون محصلة ق.د.ك حول المثلث صفراً للمركبة الاساسية وثلاثة اضعافها في الطور الواحد لمركبة التوافقية الثالثة. ويسمح ذلك بتدوير تيار التوافقية الثالثة داخل المثلث دون تدفقه في الخطوط. ويؤدي تدفق تيار التوافقية الثالثة داخل المثلث الى اخماد

ق.د.ك التوافقية الثالثة وحجبها بين الخطوط بامتصاصها في هبوط الجهد في معاوقة التوافقية الثالثة في المثلث.

4 - في توصيلة النجم باربعة اسلاك تكون محصلة تيارات ادرع النجم صفراً للمركبة الاساسية وثلاثة اضعافها في الطور الواحد لمركبة التوافقية الثالثة عبر خط الحياد. وبذلك يتدفق تيار التوافقية الثالثة في الاطوار والخطوط وهو ما يؤدي الى اخماد ق.د.ك التوافقية الثالثة جزئياً او كلياً في الاطوار وفقاً لمعاوقة التوافقية الثالثة، وأن وجدت فهي لن تظهر بين الخطوط.

5 - في توصيلة النجم بثلاثة اسلاك لاتتدفق تيارات التوافقية الثالثة لعدم وجود منفذ لها، ويكون تيار الاثارة جيبياً، مما يستوجب وجود ق.د.ك توافقية ثالثة في الاطوار. ولاتظهر ق.د.ك التوافقية الثالثة بين الخطوط لكونها منطبقة طورياً وتلغي بعضها البعض، ولكنها تؤدي الى تأرجح جهد الاطوار ونقطة الحياد لاختلاف تردد ق.د.ك الاساسية e1 والتوافقية الثالثة e3 كما في الشكل (30) الذي يبين متجهات ق.د.ك للحظات مختلفة. وهنا تعطى ق.د.ك الطور a بالمعادلة:

$$e_{a3}=e_{b3}=e_{c3}=e_3, e_a=e_{a1}+e_3=E_1 sin\omega t+E_3 sin 3\omega t \quad (2.93)$$



الشكل (30) تأرجح جهد نقطة الحياد المعزولة في توصيلة النجم.

6 - في توصيلة النجم المتعرج تتكون لفائف كل طور من نصفين موصلين على التوالي في قطبية عكسية. وبذلك لايمكن لجهود التوافقية الثالثة الظهور في الاطوار والخطوط في جميع الاحوال وسواء كانت نقطة الحياد موصلة ام معزولة لكون ق.د.ك التوافقية الثالثة في كل منهما متساوية ومنطبقة طورياً ومن تم تلغي بعضها البعض. وكما في توصيلة النجم يمكن لتيار التوافقية الثالثة ان يتدفق عبر نقطة الحياد عند استخدام اربعة اسلاك ولن يتدفق عند استخدام ثلاثة اسلاك، ولكن عدم تدفقها في الحالة الاخيرة لايستلزم ظهور ق.د.ك توافقية ثالثة في الاطوار.

وبالاضافة الى القواعد السابقة والمتعلقة بخواص توصيلات لفائف الاطوار، يعتمد ظهور تيارات وجهود التوافقية الثالثة في المحولات ثلاثية الطور على نوع بنية المحول حيث يجب التمييز بين مصرف المحولات بدوائره المغناطيسية الثلاثة المستقلة، ومحول الوحدة ثلاثية الطور ذو الدائرة المغناطيسية المشتركة. **ويمكن تلخيص ظهور التوافقيات وفقاً لنوع وتوصيلة اطوار جانبي المحول كما يلي:**

1 - مصرف محولات توصيلة مثلث- مثلث: في هذه الحالة يكون كل من جهد وتيار المصدر جيبيان وخاليان من مركبات التوافقية الثالثة، كما ان كثافة الفيض لاتبتعد كثيراً عن الشكل الجيبي. وستدور مركبة التوافقية الثالثة لتيار المغنطة كتيار قصر داخل مثلثي الجانبين وبما يتناسب عكسياً مع معاوقة التوافقية الثالثة في كل من الجانبين.

2 - مصرف محولات توصيلة نجم- نجم بدون خطي الحياد: في هذه الحالة لن يتدفق تيار توافقية ثالثة في جانبي المحول ويكون تيار المصدر جيبي وقمة الشكل الموجي لكثافة الفيض مسطحة. وتظهر مركبة توافقية ثالثة في ق.د.ك الطور تجعل جهد نقطة الحياد متذبذباً وق.د.ك

الطور متأرجحةً. ولكن ق.د.ك المحول وجهد المصدر بين الخطوط يكونان متزنان وجيبيان.

3 - مصرف محولات توصيلة نجم- نجم مع خطي حياد: في هذه الحالة يؤدي وجود خط الحياد في الجانبين الى جعل المحولات تعمل وكأنها وحدات احادية الطور مستقلة مغناطيسياً وكهربائياً. وتوفر خطوط الحياد مسار العودة لمركبة التوافقية الثالثة لتيارات المغنطة للاطوار في الجانبين ويتم اخماد ق.د.ك التوافقية الثالثة جزئياً او كلياً وفقاً لمعاوقة التوافقية الثالثة في الجانبين.

4 - مصرف محولات توصيلات نجم- مثلث ومثلث- نجم بدون خط حياد: في هذه الحالة يكون اداء التوصيلتان فيما يخص التوافقية الثالثة شبيه بتوصيلة مثلث- مثلث. ويزيد وجود المثلث في جانب واحد فقط معاوقة التوافقية الثالثة ويجعل الشكل الموجي للفيض اكثر بعداً عن الشكل الجيبي.

5 - مصرف محولات توصيلات نجم- مثلث ومثلث- نجم بوجود خط حياد: في هذه الحالة يكون اداء التوصيلتان فيما يتعلق بالتوافقية الثالثة مشابهاً لتوصيلة نجم- نجم بخطي حياد. ويترتب على وجود المثلث في احد الجانبين دوران مركبة التوافقية الثالثة لتيار المغنطة داخل المثلث وعدم تدفقها في الخطوط، وبالتالي عدم سحبها من المصدر ان كان جانب المثلث يمثل الابتدائي.

6 - مصرف محولات توصيلة مثلث- نجم متعرج او نجم- نجم متعرج: في هذه الحالة يكون اداء التوصيلتان فيما يتعلق بالتوافقية الثالثة مشابهاً لتوصيلة مثلث- نجم و نجم- نجم المناظرة، مع عدم ظهور ق.د.ك التوافقية الثالثة في الاطوار كما هي بين الخطوط في جانب النجم المتعرج.

7 - مصـرف محـولات مـع لفـائف ثالثيـة مثلـث: وتسـتخدم مـع توصـيلات نجم- نجم و نجم- نجم متعرج حيث يتم تجهيز المحولات بلفائف ثالثية توصّل كمثلث لتوفير دارة لتدفق تيارات التوافقية الثالثة لانشاء فيض جيبي ومَن تم اخماد ق.د.ك التوافقية الثالثة والحد من تأرجح جهد الحياد.

8 - وحـدة ثلاثيـة الاطـوار نـوع قشـري: في هـذه الحالـة تكـون الـدوائر المغناطيسية للاطوار مستقلة وغير متداخلة (أي ان فيض لفائف أي طور لاتشبك لفائف أي طور آخر). وبذلك يكون اداء المحول مماثل تماماً لمصرف المحولات المناظر له في توصيلات الحالات (1) الى (6) السابقة.

9 - وحـدة ثلاثيـة الاطـوار نـوع لـبي: في حالـة محـول اللـب ثلاثـي السـيقان تكون فيوض التوافقية الثالثة دائماً في اتجاه واحد في السيقان الثلاثة لتعود خلال الهواء والزيت وجدار وعائه وتخمدها الممانعة العالية لهذه المسارات. ويحد ذلك كثيراً من ق.د.ك التوافقية الثالثة، بينما يتدفق تيار التوافقية الثالثة بحسب ما تسمح به التوصيلة وكما سبق. وفي المقابل يوفر السـاقيين الخـارجيين لمحـول اللـب خماسـي السـيقان مسـار الفيض وتجعل اداء المحول شبيهاً بمحول اللب القشري.

3.11.2 – توصيلات المحول ثلاثي الطور.

يمكن باستخدم هيئة المثلث و النجم او النجم المتعرج في ربط لفائف أي من جانبي المحول ثلاثي الطور الوصول الى العديد من الاحتمالات الممكنة لتوصيل جانبي المحول بهيئات متشابهة او مختلفة. وعادة ما يتم تمييز نهايات لفائف الجهد العالى ونهايات الجهد المنخفض باستخدام الحروف الكبيرة مثل (A, B, C) كرموز لنهايات جانب الجهد العالي HV، واستخدام الحروف الصغيرة مثل (a, b, c) كرموز لنهايات جانب الجهد المنخفض

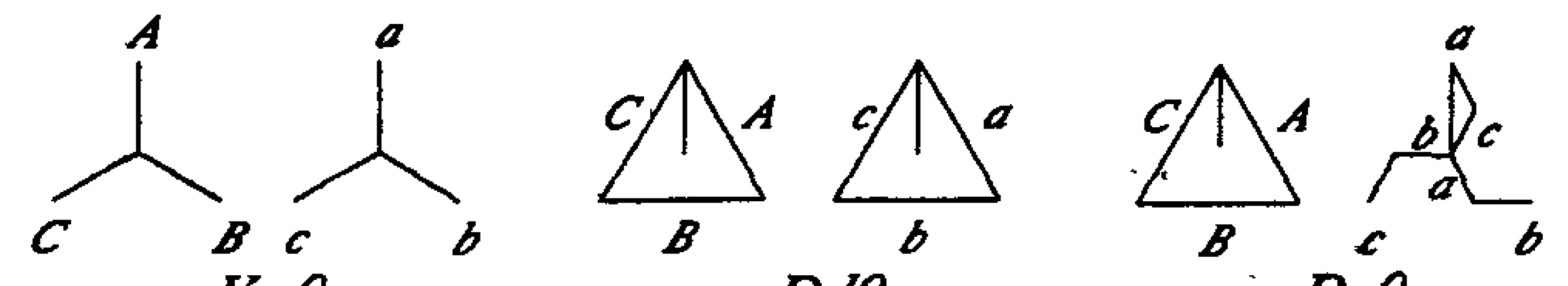
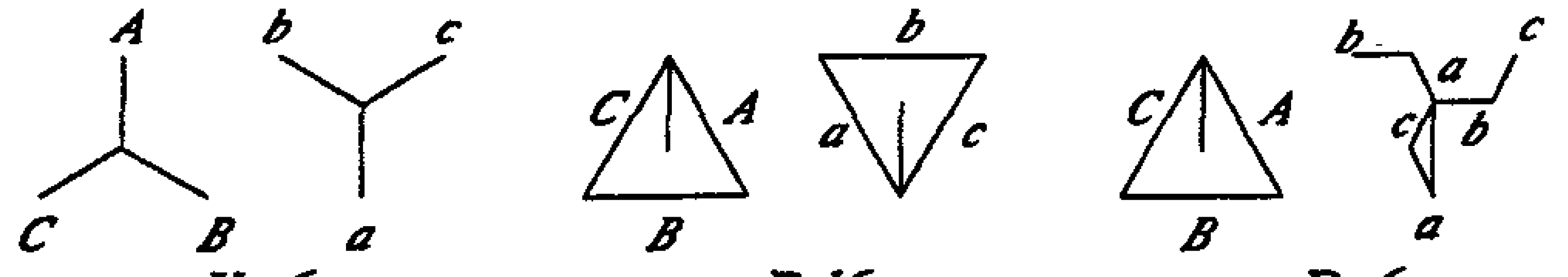
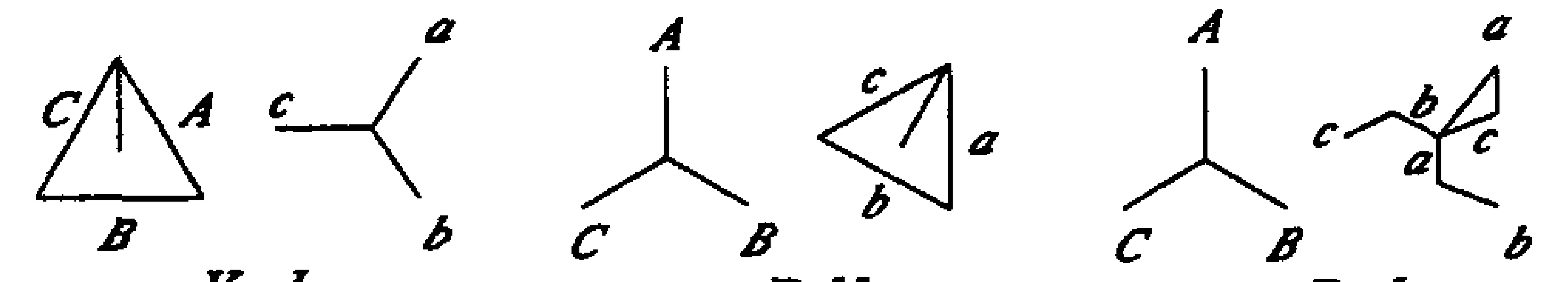
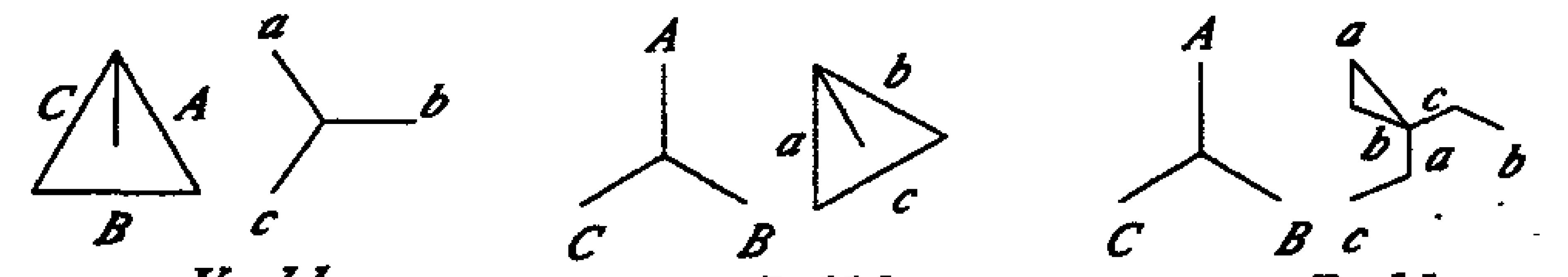
LV. وفي حالة وجود لفائف ثالثية في المحول ثلاثي الطور يتم اسباق الرموز الحرفية للفائف الثالثية بالرقم 3 مثل (3a, 3b, 3c).

ويتم تمييز نهايات لفائف كل طور بالحاق الادلة السفلية 1 و 2 بحرف اللفائف وعند وجود نقاط مآخذ بينية في اللفائف او عند تكوينها من عدة اجزاء يتم ترقيم نقاط التوصيل على طول اللفائف بالتسلسل ابتداءً من النهاية 1. وعلى سبيل المثال تشير الرموز (a_1, a_2, a_3, a_4) الى وجود نقطتي مآخذ بينية على لفائف الطور a بجانب الجهد المنخفض او انقسام هذه اللفائف الى جزئين لكل منهما بديته ونهايته الخاصة به. واذا كان اتجاه ق.د.ك الطور A في لحظة ما A_1A_2 ، فإن ق.د.ك الطور المناظر بجانب الجهد المنخفض في تلك اللحظة يكون a_1a_2.

وبينما تكون ق.د.ك الطور للجانبين الابتدائي والثانوي للمحول ثلاثي الطور اما منطبقة او متضادة طورياً كما في المحول احادي الطور، فإن الازاحة الطورية بين ق.د.ك الخطوط تعتمد على هيئة توصيل اللفائف وتتابع الاطوار، حيث يؤدي قلب التتابع الى عكس الازاحة بين جهد الخطوط. وعلى سبيل المثال لايمكن ان تكون ق.د.ك خطوط الجانبين الا منطبقة او متضادة طورياً في توصيلة نجم- نجم، فهي يمكن ان تكون منطبقة او متضادة طورياً او ان يكون بينها ازاحة $\pm 30°$ في توصيلة نجم- مثلث وفقاً لترتيب وتتابع الاطوار.

ووفقاً للمواصفات البريطانية BS171 يرمز لهيئة توصيل لفائف المحول ثلاثي الطور بالاحرف D/d للمثلث و Y/y للنجم و Z/z للنجم المتعرج حيث يمثل الحرف الكبير لفائف الجهد العالي والحرف الصغير لفائف الجهد المنخفض. ويعبر عن الازاحة الطورية لجهد الخط المنخفض نسبةً لجهد الخط العالي (محور الاسناد) برقم الساعة التي تصنع نفس الزاوية مع الساعة الثانية عشرة (الصفر). وتبعاً لذلك تصنف المحولات ثلاثية الطور طبقاً

لتوصيلتها الى اربعة مجموعات طورية كما في الجدول (1) التالي والذي يبين كذلك المخططات الطورية لتوصيلات هذه المجموعات.

المجموعة والازاحة	رموز توصيلات المجموعة ومخططاتها الطورية
1 لاتوجد (0)	 Yy0 Dd0 Dz0
2 (06) 180°	 Yy6 Dd6 Dz6
3 30°−(01)	 Yy1 Dd1 Dz1
4 +30° (11)	 Yy11 Dd11 Dz11

الجدول (1) المخططات الطورية للمحولات ثلاثية الطور.

ويميز توصيلة المثلث كون التيار المتدفق في اللفائف لايتجاوز 57.7% من تيار الخط مما يقلل من حجم سلك اللف وكمية النحاس المطلوبة. ويعيبها عدم وجود خط حياد وضرورة عزل اللفائف لجهد الخط الكامل وهو ما يجعلها الامثل اقتصادياً للفائف الجهد المنخفض. كما انها تمتاز بحجب تيار التوافقية الثالثة ومنع تدفقها في الخطوط، والاداء الافضل عند عدم اتزان الحمولة.

ويميز توصيلة النجم توفّر خط الحياد ومستويين جهد باربعة اسلاك، وتعرّض اللفائف لنسبة 57.7% فقط من جهد الخط مما يقلل من متطلبات

العزل. ويعيبها تدفق كل تيار الخط في اللفائف وهو ما يجعلها الامثل اقتصادياً للفائف الجهد العالي. ويعيبها تدفق تيار التوافقية الثالثة في الخطوط او تأرجح جهد الاطوار نتيجةً لجهود التوافقية الثالثة، ويمكن الحد من ذلك بتأريض نقطة الحياد.

وتوفر توصيلة النجم المتعرج جميع ميزات توصيلة النجم اضافة الى منع تأرجح جهد الاطوار نتيجةً لجهود التوافقية الثالثة، ويعيبها ارتفاع تكلفتها مقارنةً بتوصيلة النجم المكافئة.

وتحدد طبيعة الحمل وخصائص المنظومة المستخدم فيها المحول ثلاثي الطور التوصيلة الانسب للفائف جانبي المحول. وفيما يلي ملخص لاهم استخدامات ومزايا وعيوب هذه التوصيلات:

1 - نجم- نجم (Yy0, Yy6): وتستخدم لتغذية حمولات الجهد العالي الصغيرة والمتزنة. ويميزها امكانية ربط سلك الحياد الرابع في الجانبين لتوفير جهد تغذية متزن للاحمال احادية الطور. ويعيبها عند تغذية احمال غير متزنة عدم الاتزان المفرط في جهود الاطوار، وعدم قدرتها على اخماد جهود وتيارات التوافقية الثالثة في الخطوط في آن واحد. ويمكن حل مشاكل عدم التوازن ومركبات التوافقية الثالثة بالتأريض المباشر لنقاط الحياد او باستخدام لفائف مثلث ثالثية.

2 - مثلث- مثلث (Dd0, Dd6): وتستخدم لتغذية حمولات الجهد المنخفض ثلاثية الطور الكبيرة. ويميزها خلو تيار وجهد خطوط الجانبين من مركبات التوافقية الثالثة وعدم حساسيتها للاحمال غير المتزنة. ويعيبها عدم وجود نقطة حياد لتوفير مستويين لجهد التغذية باربعة اسلاك.

3 - نجم- مثلث (Yd1, Yd11): وتستخدم في خفض الجهد لتغذية الاحمال ثلاثية الطور الكبيرة. ويميزها اخماد جهود التوافقية الثالثة

بتدوير تيار التوافقية الثالثة في المثلث وكونها اقدر على تغدية الاحمال غير المتزنة من توصيلة Yy. ويعيبها عدم وجود نقطة الحياد في جانب المثلث.

4 - مثلث- نجم (Dy1, Dy11): بالرغم من انها الامثل اقتصاديا لرفع الجهد فهي تستخدم في انظمة التوزيع لخفض الجهد وتوفير مستويين للجهد باربعة اسلاك لتغذية الاحمال العامة حيث عادة ما تؤرض نقطة الحياد. وتتميز بنفس مزايا توصيلة Yd ولاتوجد لها عيوب مهمة.

5 - نجم- نجم متعرج (Yz1, Yz11): وتستخدم لتغذية حمولات الجهد العالي الصغيرة وغير المتزنة. ويميزها الغاء جهود التوافقية الثالثة في جانب z مع وجود نقطة الحياد لتأريض الابتدائي وتوفير تغدية باربعة اسلاك في الثانوي. ويعيبها ارتفاع تكلفة لفائف النجم المتعرج.

6 - مثلث- نجم متعرج (Dz0, Dz6): وتستخدم في حالات الحمولات المفرطة في عدم الاتزان مثل دوائر التقويم. وهي تمتاز بالجمع بين ميزات كل من توصيلتي Yy و Dd. ولايعيبها سوى ارتفاع تكلفة لفائف النجم المتعرج مقارنةً بلفائف النجم المكافئ.

7 - لفاف المثلث الثالثية (3d): وقد تستخدم بالاضافة الى تدوير تيار التوافقية الثالثة وتثبيت جهد الحياد في توصيلات (Yy)، في تزويد احمال خاصة مثل النظم المساعدة في محطات التوليد او لتوصيل معدات خاصة مثل متسعات تعويض القدرة المتفاعلة في محطات التحويل.

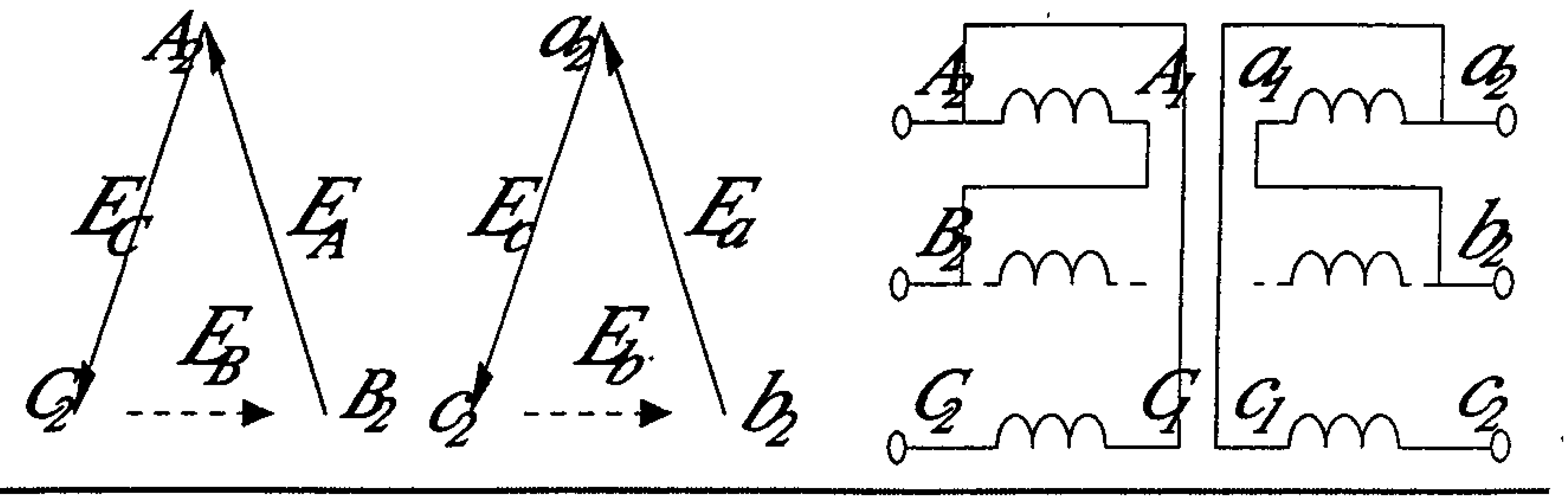
4.11.2 – التحويل ثلاثي الطور باستخدام محولين.

تعرف توصيلات المحولات ثلاثية الطور المستخدمة للتحويل ثلاثي الطور بالتوصيلات القياسية للمحولات ثلاثية الطور. ويمكن بالاضافة الى

ذلك الحصول على العديد من التوصيلات الخاصة للمحولات متعددة الاطوار والتي تخرج عن هذا القياس وقد يتطلب بعضها محولات خاصة. ومن اشهر هذه التوصيلات تلك التي يتم فيها استخدام محولين احاديين الطور فقط بدلاً من ثلاثة محولات لغرض التحويل ثلاثي الطور توصيلتي المثلث المفتوح (V-V) و توصيلة المحولين المتعامدين (T-T). وفيما يلي ملخص لخصائص واستخدامات هاتين التوصيلتين:

توصيلة المثلث المفتوح (V-V):

يمكن وكما سبق ذكره تغذية جزء من الحمولة المقننة لمصرف المحولات ثلاثية الطور بواسطة محولين فقط عند خروج الثالث. ويتم ذلك باستخدام هيئة مثلث- مثلث خاصة ينقصها ضلع المحول الخارج في الجانبين، وتسمى بتوصيلة بالمثلث المفتوح او توصيلة V ويشار لها بالرمز (V-V). والى جانب استخدامها عند خروج احد محولات مصرف المحولات فهي تستخدم كذلك لتغذية الحمولات الصغيرة التي لاتتطلب ثلاثة محولات، كما يبدء بها لتغدية الحمولات المتوقع نموها حيث يضاف المحول الثالث ويغلق المثلث لاحقاً. ويبين الشكل (31) توصيلة (V-V) ومخططها الطوري.



الشكل (31) توصيلة المثلث المفتوح (V-V) ومخططها الطوري.

واذا كان جهد المصدر ثلاثي الطور المسلط على الابتدائي متزن وباتخاذ الطور A كمحور اسناد ستكون $E_a= \quad E\angle 0°$ و $E_c=E\angle 120°$. ويمكن من الشكل (31) التعبير عن ق.د.ك بين طرفي

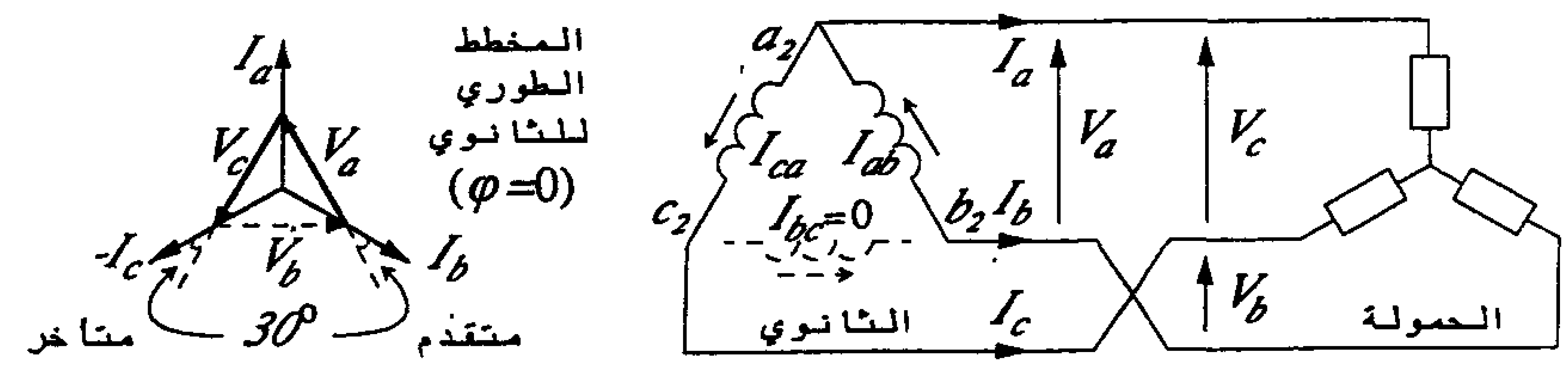
الضلع الثانوي المفتوح E_b ومن تم اثبات ان ق.د.ك E_a و E_b و E_c تمثل جهود نظام ثلاثي الطور وكأن المحول الثالث موجوداً ، وذلك كما يلي:

$$E_a + E_b + E_c = 0 \quad \Rightarrow \quad E_b = -(E_a + E_c)$$

$$E_b = -(E\angle 0° + E\angle 120°) = E\angle -120° \tag{2.94}$$

ويتبين من الشكل (31) أن تيار خط توصيلة (V-V) يساوي تيار الطور ويجب الا يتعدى $1/\sqrt{3}$=57.7% من تيار خط توصيلة (Δ-Δ) المكافئة. ولذلك يكون مقنن قدرة توصيلة (V-V) 57.7% فقط من مقنن توصيلة (Δ-Δ) المكافئة وليس ثلثيها كما قد يبدو للوهلة الاولى.

واذا كانت الحمولة متصلة نجم ومعامل قدرتها متأخر حيث يتأخر التيار عن جهد الطور بزاوية φ وكان الجانب الثانوي للمحول متصل مثلث سيتأخر تيار طوره بالمثل بزاوية φ عن جهد الطور، ولأن تيار الخط يتقدم 30° عن تيار الطور سيكون تيار خط ثانوي المحول متأخر φ-30° عن جهده. وعند فتح احد الاطوار سيتدفق في طوري المثلث المفتوح تيار الخط وليس تيار الطور، وبذلك يكون تيار هذين الطورين متأخر $\varphi\pm$30° عن جهودها وفقاً لتشابه او تعاكس تيار المحولين والحمولة وكما في المخطط الطوري المبين في الشكل (32) والذي يمثل حمولة معامل قدرتها واحد (φ=0).



الشكل (32) توصيلة الجانب الثانوي والحمولة لمحول (V-V).

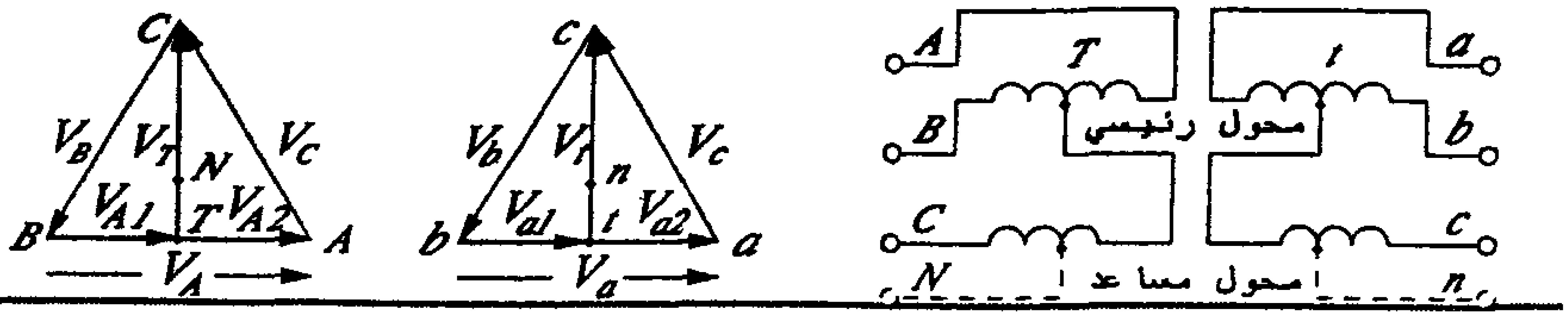
ويتضح من الشكل (32) ان تيار الخط I_C يتدفق في نفس اتجاه تيار طور المثلث المغلق ويتأخر φ+30° عن جهد طوره V_a، ويتدفق I_b في عكس اتجاه تيار طور المثلث ويتاخر φ-30° عن جهده V_C. واذا كان جهد الثانوي V_2 وتيار خطه I_2 تكون القدرة التي يغذيها كل محول كما يلي:

$$P_{T1} = V_2 I_2 \cos(30°+\varphi) \quad ,P_{T2} = V_2 I_2 \cos(30°-\varphi) \quad (2.95)$$

وبذلك لن تعمل المحولين دائماً بمعامل قدرة واحد وهو ما يعيب توصيلة (V-V) مع مايترتب عليه من عدم اتزان الجهود الثانوية للمحولين بزيادة الحمولة وان كانت متزنة. فعند م.ق حمولة 0.866 اي φ =30° على سبيل المثال، يكون م.ق المحول الاول 0.5 و م.ق الثاني 1، اما عند م.ق حمولة 0.5 اي φ =60° يكون م.ق المحول الاول صفراً ولا يغذى قدرة فعالة و م.ق الثاني 0.866. وسيعمل كلا المحولين عند م.ق داخلي 0.866 اذا كان م.ق الحمولة واحد، ولايمكن لأي منهما تغذية اكثر من 86.6% من مقننه ولايمكنهما معاً تغذية أكثر من 86.6% من مقننهما معاً.

توصيلة (T-T) للتحويل ثلاثي الطور:

يمكن وكما هو الحال في توصيلة (V-V) تحويل القدرة ثلاثية الطور بمستويات جهود مختلفة باستخدام محولين فقط اذا تم ربطهما في توصيلة (T-T) والتي اخذت اسمها من طريقة توصيل لفائف لفائف جانبي المحولين على شكل تقاطع T. وخلافاً لتوصيلة (V-V) تتطلب توصيلة (T-T) محولين خاصين يختلفان عن بعضهما البعض يسمى الاول وهو الاعلى كلفة بالمحول الرئيسي. وتحتوي لفائف جانبي المحول الرئيسي الابتدائي والثانوي على مآخذ في مركزهما يقسمهما الى نصفين متساويين مقنن جهد كل نصفين موصولين على التوالي يساوي جهد الخط كما في الشكل (33).



الشكل (33) توصيلة (T-T) للتحويل ثلاثي الطور.

ويعرف المحول الثاني بالمحول المساعد كما يدعي بالمحول المضايق ويجب لتحقيق الاتزان ان يكون مقنن جهد لفائف جانبيه وعدد لفاتهما 86.6% من مقنن جهد وعدد لفات المحول الرئيسي وكما يتضح من مثلثي المخطط الطوري في الشكل (32) حيث $V_t/V_C=V_T/V_C=\sin 60°=$ $\sqrt{3}/2$. ويمثل نقطة الحياد في الجانبين مأخذ على لفائف المحول المساعد يكون الجهد بينها وبين رأس المثلث مساوياً لجهد الطور او ثلثي جهد الملف حيث $V_{TC}=V_C/\sqrt{3}=(2/\sqrt{3})V_T/\sqrt{3}=(2/3)V_T$.

وللتأكد من صحة العلاقات الطورية المبينة في المخطط الطوري في الشكل (33) يمكن بتحليل الجهود ثلاثية الطور V_A و V_B و V_C المسلطة على اطراف توصيلة T الابتدائية الى جهود اذرعها V_{A1} و V_{A2} و V_T اثبات ان $V_T=(\sqrt{3}/2)V_L$ ويتأخر 90° عن متجه V_A وذلك كما يلي:

$$V_{A1} + V_T + V_B = 0 \;, \quad V_{A1}=V_{A2}=½V_1$$

$$V_T =-(V_B+ V_{A1})= -V_1 \angle -120° - ½V_1 \angle 0°= 0.866V_1 \angle 90° \qquad (2.96)$$

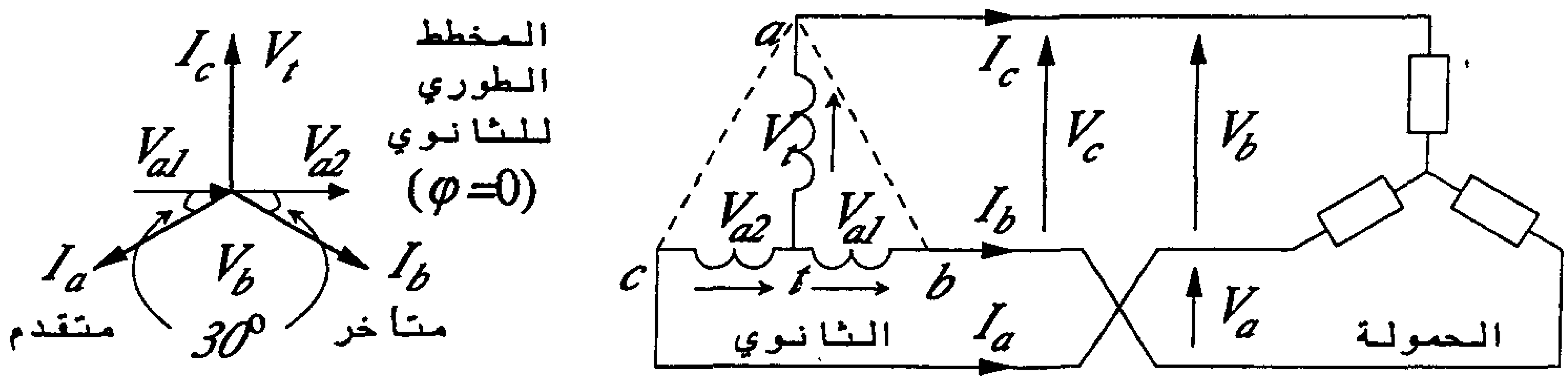
وتكون الجهود المحتثة في اذرع توصيلة t الثانوية منطبقة على جهود T الابتدائية حيث يمكن وكما هو مبين في الشكل (33) اثبات ان الجهود بين اطراف توصيلة t الثانوية تعكس جهود نظام ثلاثي الطور وتمثل تحويل حقيقي للجهود ثلاثية الطور المسلطة على T الابتدائية وذلك كما يلي:

$$V_a = V_{a1} - V_{a2} = ½V_2 \angle 0°+ ½V_2 \angle 0°= V_2 \angle 0° \quad (2.97)$$

$$V_b = -V_{a1} - V_t = -\tfrac{1}{2}V_2\angle 0° - 0.866V_2\angle 90° = V_2\angle -120° \quad (2.98)$$

$$V_c = -V_{a2} + V_t = -\tfrac{1}{2}V_2\angle 0° + 0.866V_2\angle 90° = V_2\angle -240° \quad (2.99)$$

وتعكس المعادلات (2.97) الى (2.99) نظام ثلاثي الطور جهود خطوطه واطواره متساوية وبين كل منها والذي يليه ازاحة 120° وحيث تكوّن متجهاتها مثلث مجموع جهوده الطورية صفر. ويبين الشكل (34) توصيلة الجانب الثانوي للمحول وحمولته المتصلة نجم حيث يتضح ان الازاحة الطورية بين تيار وجهد المحول المساعد تساوي زاوية معامل قدرة الحمولة لكون جهده ينطبق طورياً على جهد طور الحمولة. وفي المقابل ينطبق جهد المحول الرئيسي على جهد خط الحمولة وليس جهد طورها مما يجعل جهده يتقدم او يتأخر 30° عن جهد طور الحمولة ومن تم تكون الازاحة الطورية بين تيار وجهد المحول $\varphi \pm 30°$ وفقاً لتشابه او تعاكس تيار جزئي لفائف المحول والحمولة.



الشكل (34) توصيلة الجانب والحمولة الثانوي لمحول (T-T).

واذا كان معامل قدرة الحمولة متأخر وزاويته φ ستكون زاوية معامل قدرة المحول المساعد φ ، بينما تكون زاوية معامل قدرة المحول الرئيسي φ-30° في الجزء a1 و φ+30° في الجزء a2 وكما في المخطط الطوري للثانوي المبين بالشكل (34) والذي يمثل حمولة معامل قدرتها واحد

(φ=0). وبصفة عامة يمكن التعبير عن القدرة التي يغديها كل من المحولين كما يلي:

$$P_1=½V_2I_2\{cos(30°-\varphi)+cos(30°+\varphi)\}\ ,$$

$$P_2=0.866V_2I_2cos\varphi \qquad (2.100)$$

وكما في محول (V-V) لن يعمل المحولين بنفس معامل قدرة الحمولة يكون معامل القدرة الداخلي لكل منهما 0.866 اذا كان م.ق الحمولة واحد ، ولايمكن لأي منهما تغذية اكثر من 86.6% من مقننه ولايمكنهما معاً تغذية أكثر من 86.6% من مقننهما معاً. وبذلك لاتوجد أي ميزة في استخدام توصيلة (T-T) بدلاً من توصيلة (V-V) للتحويل ثلاثي الطور لعدة اسباب منها زيادة كلفة محول (T-T) وصعوبة تطويرها الى توصيلة (Δ-Δ) باضافة محول قياسي ثالث.

5.10.2 – التحويل بين النظم ثلاثية وثنائية الطور.

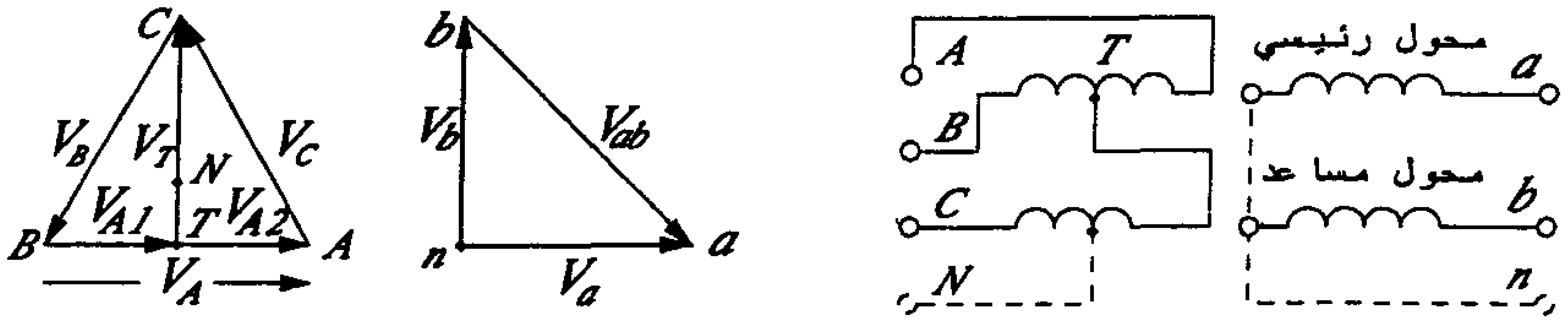
كما لايشترط للتحويل متعدد الاطوار ان يكون عدد المحولات احادية الطور لمصرف المحولات مساوي لعدد اطوار النظام، لايشترط ان يكون عدد الاطوار متساوي في الجانبين الابتدائي والثانوي. وفي الحياة العملية تتطلب بعض التطبيقات الخاصة استخدام المحولات متعددة الطور لتحويل القدرة بين نظم مختلفة في عدد اطوارها. ومن ذلك استخدام مصرف محولين او ثلاثة احادية الطور للتحويل بين نظام ثلاثي الطور وآخر ثنائي الطور بواسطة تواصيلات خاصة مثل توصيلتي سكوت ولبلانك. وفيما يلي ملخص لخصائص واستخدامات هاتين التوصيلتين.

توصيلة سكوت للتحويل بين طورين وثلاثة اطوار:

اخذت هذه التوصيلة اسمها من اسم مكتشفها شارلس سكوت حيث كانت تستخدم في بداية ظهور انظمة القوى كوسيلة للربط بين النظم

ثلاثية الطور والنظم ثنائية الطور الموجودة آنذاك. ويغلب استخدامها اليوم لتحويل القدرات الكبيرة من نظام ثلاثي الى نظام ثنائي الطور او العكس، ولكن يندر ما تدعو الحاجة للتحويل من نظام ثنائي الى النظام ثلاثي الطور. ويكاد يقتصر استخدامها حالياً على توفير القدرة ثنائية الطور لمنظومات التحكم ولتغذية الحمولات احادية الطور الكبيرة مثل الافران، وذلك لما يميزها من كفاءة عالية للتحويل بين النظامين مقارنةً بالطرق الاخرى.

وتشبه توصيلة سكوت كثيراً توصيلة(T-T) والتي يتضح من مخططها الطوري المبين في الشكل (34) وجود جهدين متعامدين في الجانب الثانوي. وهي ذات العلاقة الطورية بين جهود النظام ثنائي الطور والتي تكون على شكل حرف L، ولذلك قد يستخدم لتوصيلة سكوت الرمز (T-L). وكما في توصيلة (T-T) تتطلب توصيلة سكوت محولين خاصين احدهما المحول الرئيسي ويحتوي على مآخذ في منتصف جانبه الابتدائي، والآخر المحول المساعد ومقنن جهد جانبه الابتدائي 86.6% من نظيره للمحول الرئيسي ويتصلان الجانبين الابتدائيين معاً على شكل T كما في الشكل (35).



الشكل (35) توصيلة سكوت للتحويل بين النظم ثلاثية وثنائية الطور.

وخلافاً لتوصيلة (T-T) تكون مقننات جهد الجانب الثانوي لمحولي توصيلة سكوت متساوية حيث يمكن الحصول على نظام ثنائي الطور ذو ثلاثة اسلاك بربط الجانبين الثانويين للمحولين مع بعضهما البعض من احدى طرفيهما بخط حياد وكما هو مبين في الشكل (35). ومن الواضح ان العلاقة بين جهد الطور $V_a=V_b=V_p$ وجهد الخط $V_{ab}=V_L$ للنظام ثنائي

الطور هي $V_L=\sqrt{2}V_p$. ونظراً لأن جهود الخطوط للفائف المحولين الرئيسي والمساعد في توصيلة سكوت متساوية في الجانب الثانوي ومختلفة في الجانب الابتدائي ستكون نسبة تحويل المحولين او نسبة عدد لفاتهما مختلفة.

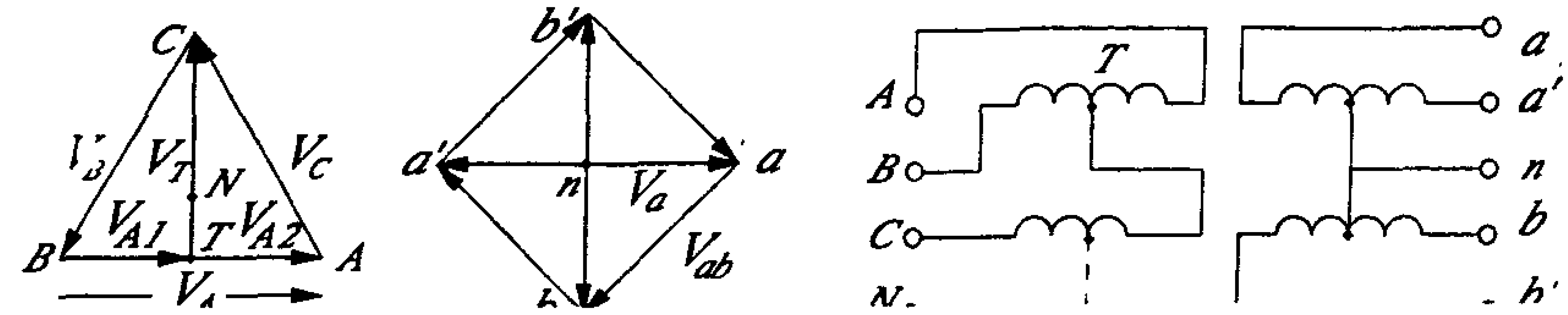
واذا كان عدد لفات الثانوي لكلا المحولين N2 وعدد لفات ابتدائي المحول الرئيسي N_1 يكون عدد لفات ابتدائي المحول المساعد $(\sqrt{3}/2)N_1$ وتكون نسبة عدد لفات المحول الرئيسي $a=N_1/N_2$، ونسبة عدد لفات المحول المساعد $(\sqrt{3}/2)N_1/N_2=0.866a$. ويمكن من الشكل (35) ايجاد نسب تحويل جهود وتيارات توصيلة سكوت لمحولين مثاليين بالتعبير عن توازن القدرة المركبة بين الجانبين كما هو الحال في أي محول وذلك كما يلي ($V_A=V_B=V_C=V_1,\ V_a=V_b=V_2$):

$$V_1/V_2=N_1/N_2=a \quad \Rightarrow \quad V_2=V_1/a \tag{2.101}$$

$$S_{2\phi}=S_{3\phi} \quad \Rightarrow \quad 2V_2I_2=\sqrt{3}V_1I_1 \tag{2.102}$$

$$I_2=(\sqrt{3}/2)\ (V_1/V_2)I_1=(\sqrt{3}/2)\ a\ I_1 \tag{2.103}$$

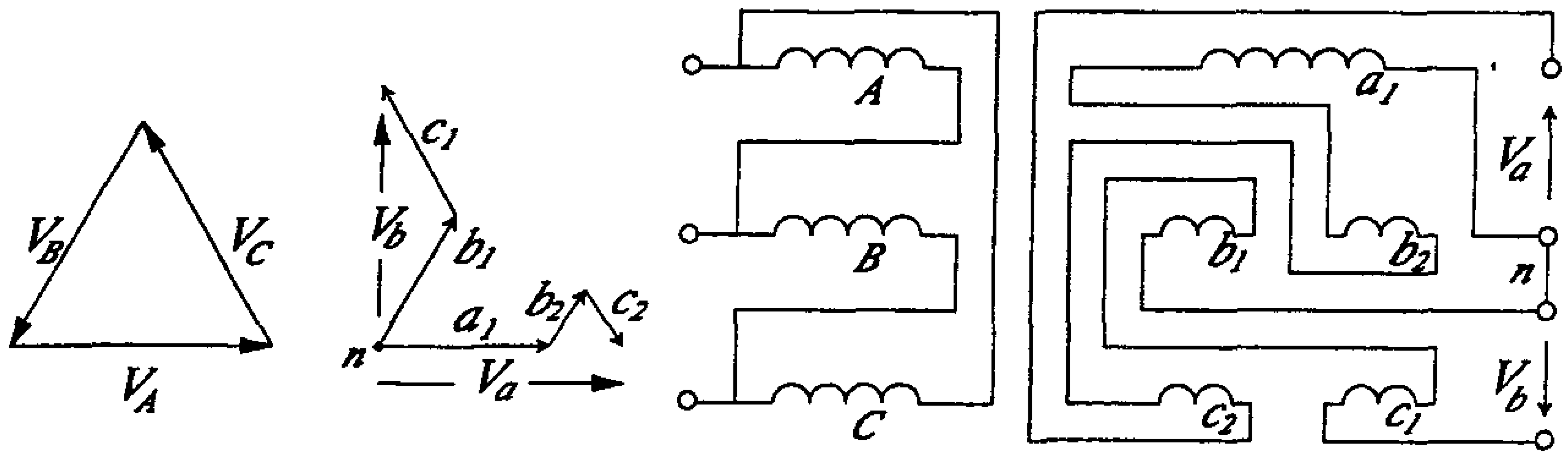
كما يمكن الحصول على نظام ثنائي الطور ذو خمسة اسلاك باضافة مآخذ في منصف لفائف الجانبين الثانويين للمحولين وربطهما متقاطعين كما في الشكل (36). ويسمى النظام ثنائي الطور ذو خمسة اسلاك احياناً بالنظام رباعي الاطوار وهو يوفر اربعة جهود خطوط واربعة جهود اطوار حيث توجد ازاحة 90° بين كل جهدي خط متجاورين وكل جهدي طور متجاورين، كما توجد ازاحة 45° بين جهد الخط وجهد الطور. وهنا كذلك يمثل جهد الخط محصلة جهد طورين وتكون العلاقة بين جهدي الخط والطور كما في في النظام ثنائي الطور أي $V_L=\sqrt{2}V_p$.



الشكل (36) توصيلة سكوت للتحويل الى نظام ثنائي الطور 5 اسلاك.

توصيلة لبلانك للتحويل بين طورين وثلاثة اطوار:

تمثل توصيلة لبلانك بديل لتوصيلة سكوت لتحويل القدرة من نظام ثلاثي الى نظام ثنائي الطور وهي تمتلك بعض الميزات مقارنةً بالاخيرة وان كانت اقل شهرةً واستخداماً منها. ويستخدم لتوصيلة لبلانك لب اعتيادي ثلاثي السيقان مقارنةً بمحولين احادية الطور في توصيلة سكوت وهو ما يجعلها اقل كلفة من الاخيرة. ومن ميزات توصيلة لبلانك ان لفائف الجانب الابتدائي ثلاثية الطور اعتيادية يتم توصيلها كمثلث لتكون اكثر ملائمة لاخماد جهود التوافقية الثالثة ولتغذية الحمولات غير المتزنة. ويبين الشكل (37) ترتيب لفائف توصيلة لبلانك ومخططها الطوري.



الشكل (37) توصيلة لبلانك للتحويل بين النظم ثلاثية وثنائية الطور.

وتجزأ لفائف الثانوي للاطوار الثلاثة الى اجزاء مختلفة في عدد لفاتها يتم توصيلها بشكل مناسب لتكوين لفائف النظام ثنائي الطور كما في الشكل (37). واذا كان عدد اللفات المكافئ لجهد طور الثانوي n سيتضح ان الجزء a_1 يضم $(2/3)n$ لفة وكل من الجزئين b_1 و c_1 يضم $(1/\sqrt{3})n$ وكل من الجزئين b_2 و c_2 يضم $(1/3)n$. وينتج الطور a للنظام ثنائي الطور

بجمع الاجزاء a_1 و b_1 و c_1 على التوالي، والطور b بجمع الجزئين b_2 و c_2 على التوالي بالقطبية المبينة. ويمكن اثبات ان الجمع الطوري لهذه الاجزاء يعطي جهدين متسويين متعامدين يمثلان نظام ثنائي الطور كما يلي:

$$V_a=V_{a1} \quad -V_{b2} \quad -V_{c2}= \quad (1/3)(2\angle 0°-1\angle -120°-1\angle 120°) V_2= V_2\angle 0° \qquad (2.104)$$

$$V_b=-V_{b1}+V_{c1}= (1/\sqrt{3})(-1\angle -120°+1\angle 120°)V_2= jV_2=V_2 \angle 90° \qquad (2.105)$$

وبذلك تكون العلاقة الطورية بين جهود النظام ثنائي الطور على شكل حرف L حيث يمكن استخدام الرمز (D-L) لتوصيلة لبلانك. ويعيب هذه التوصيلة صعوبة الحصول على عدد لفات كسري لتوفير النسبة بين عدد لفات الاجزاء المختلفة للفائف الثانوي بدقة.

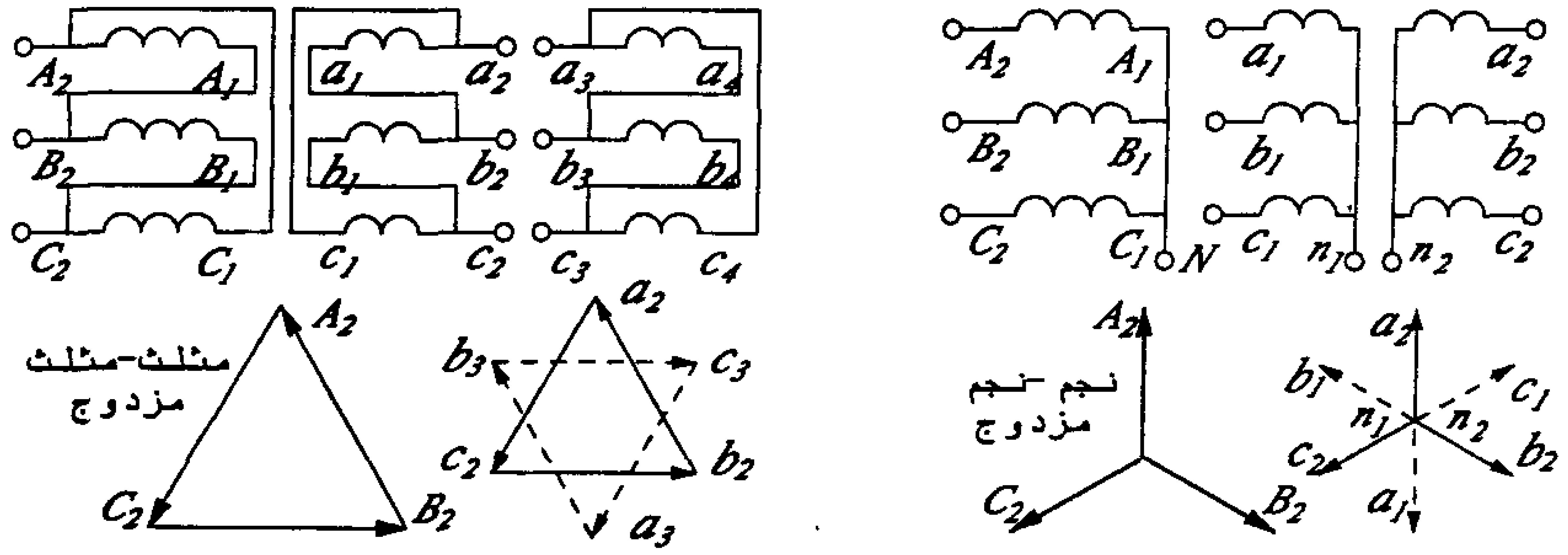
6.11.2– التحويل من نظام الثلاثي الى سداسي الطور.

توفر محولات القوى لما تتميز به من كفاءة وجودة عالية اداة ممتازة لتحويل القدرة من النظام ثلاثي الطور لتغذية النظم متعددة الاطوار والتي تضم عدد اكبر من الاطوار من مضاعفات الثلاثة. وتكتسب النظم كثيرة الاطوار اهمية خاصة في توفير مصادر تيار مستمر ذات قدرة وجودة عالية لتغدية انظمة التقويم لخفض تموّجات موجة التيار المستمر الخارجة باستخدام عدد اكبر من الاطوار. وبالرغم من امكانية الحصول على أي من مضاعفات الثلاثة اطوار فقد اشتهر استخدام انظمة الستة والاثنى عشر والاربعة وعشرون طوراً وحيث يتضاعف عدد الاطوار من نظام الى الاعلى منه.

ولاتختلف بنية المحول اللازمة للتحويل من النظام ثلاثي الطور الى نظم مضاعفاته من الاطوار عن بنية المحول ثلاثي الطور ويمكن استخدام مصرف ثلاثة محولات احادية الطور او وحدة ثلاثية الطور، ويجب تجزئة

لفائف كل طور ثانوي (من الثلاثة) الى اجزاء عددها مساويا لنصف عدد اطوار النظام المطلوب. وبذلك يجب تقسيم لفائف كل طور ثانوي الى نصفين متساوين للتحويل من ثلاثة الى ستة اطوار والى اربعة اجزاء للتحويل لاثنى عشر طوراً والى ثمانية اجزاء لاربعة وعشرون طوراً.

ويمكن باستخدام توصيلتي النجم المزدوج والمثلث المزدوج تحويل النظام ثلاثي الطور الى نظام مماثل لنظام ستة اطوار. وفي توصيلة النجم المزدوج تقسم لفائف كل طور ثانوي الى نصفين وتربط كل ثلاثة انصاف متماثلة معاً لتكوين نجمين متعاكسين لكل منهما نقطة حياده، ويكوّنان معاً نظام ستة اطور. وفي توصيلة المثلث المزدوج تربط كل ثلاثة من انصاف لفائف الثانوي المتماثلة لتكوين مثلثين متعاكسين تكوّن رؤسهما نظام مماثل لنظام ستة الطور وكما هو مبين في الشكل (38). وفي الحالتين يمكن توصيل لفائف الابتدائي ثلاثية الطور نجم او مثلث حسب متطلبات التشغيل.

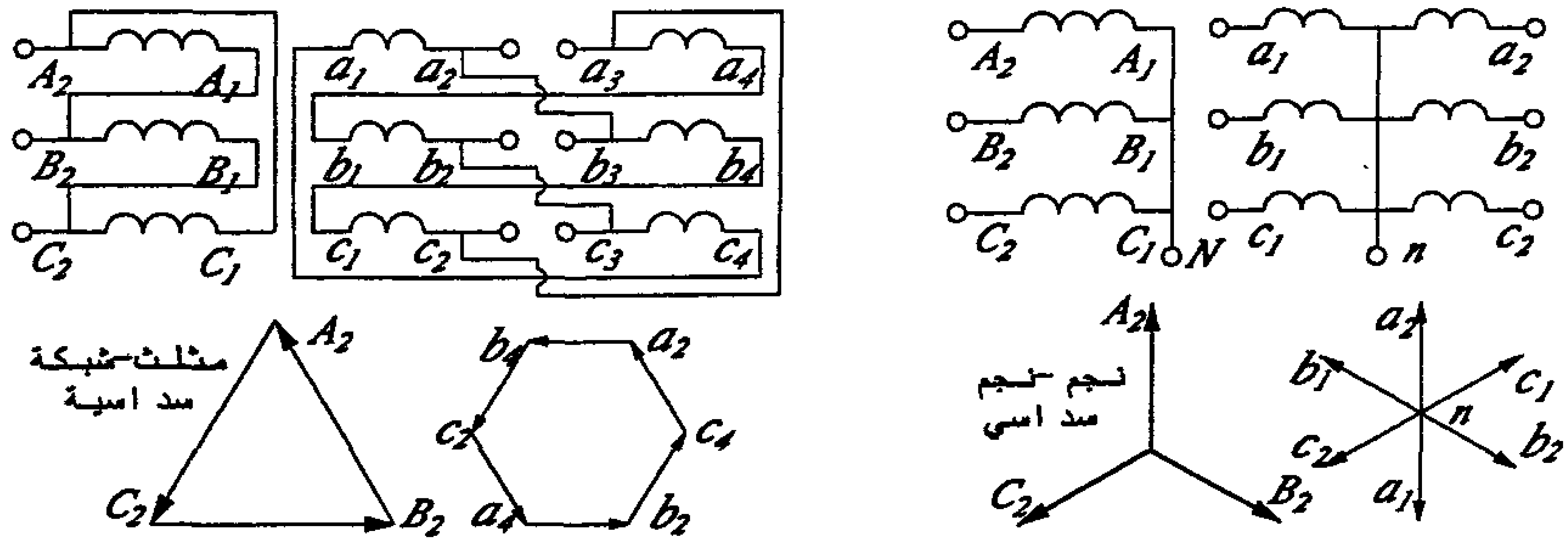


الشكل (38) توصيلات النجم المزدزج والمثلث المزدوج.

ومن الجدير بالملاحظة في النظم متعددة الاطوار الحقيقية ان الازاحة الطورية بين كل طورين متعاقبين لنظام ذو p طور هي $(360°/p)$ والعلاقة بين جهد الخط وجهد الطور للنجم متعدد الاطوار هي $V_L=2V_p sin(180/p)$. وبذلك تكون الازاحة بين كل طور والذي يليه وبين كل خط والذي يليه في النظام سداسي الطور $60°$، كما يكون جهد

الخط بين أي طورين مساوياً لجهد الطور. ويتضح من الشكل (38) ان توصيلة المثلث المزدوج لاتمثل نظام سداسي الطور حقيقي لكون تيار الخط لايساوي تيار الطور، وأن كانت التوصيلة تعطي جهود سداسية الطور بين رؤس مثلثيها.

ويمكن الحصول على نظام سداسي الطور نجمي حقيقي بربط نقطتي تعادل النجمين المستقلين في توصيلة النجم المزدوج فيما يعرف بتوصيلة النجم سداسي الطور حيث تيار الخط يساوي تيار الطور وكذلك جهد الخط يساوي جهد الطور. كما يمكن الحصول على نظام سداسي الطور شبكي حقيقي بربط اطراف انصاف لفائف الثانوي على التوالي فيما يعرف بالشبكة سداسية الطور حيث تكون جهود وتيارات الاطوار والخطوط متساوية وكما في النجم سداسي الطور. ويبين الشكل (39) توصيلتي النجم سداسي الطور والشبكة سداسية الطور ومخططاتها الطورية.



الشكل (39) توصيلات النجم سداسي الطور والشبكة سداسية الطور.

وبالمثل يمكن الحصول على نظام اثنى عشر طوراً بتقسيم كل من لفائف الثانوي المناظرة للنظام ثلاثي الطور الى اربعة اجزاء يتم توصيلها للحصول على نجم اثنى عشري او شبكة اثنى عشرية. وكذلك يمكن الحصول على نظام اربعة وعشرون طوراً بتقسم لفائف الثانوي الى ثماني اجزاء مستقلة. وبينما يطرح النظام سداسي الطور كبديل مستقبلي افضل للنظام ثلاثي الطور السائد الآن، فإن انظمة الاثنى عشر طوراً والاربعة

- وعشرون طوراً تجد تطبيقاتها في انظمة النقل للربط بين خطوط جهود التيار المتردد العالية (HVAC) وجهود التيار المستمر العالية (HVDC).

12.2 - تشغيل المحولات على التوازي.

يتطلب النمو الطبيعي لحمولات منظومة القوى رفع قدرة محولات المنظومة مع زيادة الحمولة. وبينما يمكن تحقيق ذلك باستبدال المحولات القديمة بمحولات جديدة ذات مقنن اكبر مع نمو الحمولة، فإن اضافة محول آخر على التوازي مع المحول القديم ليتقاسم معه الحمولة كثيراً ما يكون اقل تكلفة. كما ان التغير الطبيعي والكبير لحمولات المنظومة خلال ساعات اليوم ومواسم السنة يجعل محولاتها المنفردة تعمل عند كسر بسيط حملها المقنن لفترات طويلة وقريباً من حملها المقنن التام لفترات اقل. ويفضل في الحالات التي تتغير فيها الحمولة بشكل ثابت تغذية الحمولة بمحولين يعملان على التوازي عند الحمولة الكبرى ليخرج احدهما عند هبوط الحمولة عن مستوى محدد.

ويرفع وجود عدد من المحولات تعمل على التوازي من مستوى أمن التغذية وضمان الاستمرار في تغذية جزء من الحمولات عند حدوث أي عطب في احد المحولات المتوازية، كما يخفض ذلك من حجم الوحدات الاحتياطية المطلوبة امنياً في محطات التحويل الرئيسية في شبكة النقل والتوزيع. ولكون كفاءة المحول تعتمد على مستوى الحمولة فإن تشغيل المحولات على التوازي يسمح بتحميل كل منها بحمولات اقرب لحمولة كفائتها العظمى لخفض تكلفة تشغيلها.

وفي الحياة العملية عادة ما تكون المحولات التي يتم توصيلها مع بعضها البعض على التوازي قد صممت لنفس التردد ولنفس مستويات الجهد. وبصفة عامة يجب عند تشغيل المحولات احادية الطور على التوازي مراعات الشروط التالية لضمان كفاءة التشغيل:

1 - ان تكون جهود الجانبين الثانويين متساويين ومنطبقين طورياً، وهو ما يتطلب تساوي نسبة عدد اللفات المحولات وتوصيل لفائف جانبيها بنفس القطبية. ويؤدي تشغيل المحولات على التوازي مع اختلاف جهودها الثانوية الى تدفق تيار دوار بينها. ويزيد التيار الدوار من فقد النحاس، خصوصا عند الحمل الخفيف، وهو مما يقلل من كفاءة المحولات. ويمكن السما ح بالاختلاف البسيط بين الجهود اذا كان ذلك لايؤدى الى تيار دوار ذو قيمة ضارة.

2 - ان يكون هبوط الجهد في المعاوقات المكافئة للمحولات متساوي ومنطبق طورياً، وهو ما يتطلب ان تكون النسبة بين المعاوقة المكافئة للمحولات عكس النسبة بين مقنناتها لضمان توزيع القدرة المركبة للحمولة بينها بما يتناسب مع مقنناتها. ويتطلب تغذية المحولات لقدرة فعالة تتناسب مع مقنناتها تشغيلها بنفس معامل القدرة وهو ما يتطلب تساوي نسبة المقاومة الى المفاعلة.

وبالاضافة الى هذه الشروط يشترط لتشغيل المحولات ثلاثية الطور الموصلة على التوازي ما يلي:

1 - ان تكون نسبة جهد الخطوط متساوية، مع ملاحظة ان هذه النسبة لاتعتمد فقط على نسبة عدد لفات الاطوار وانما كذلك على توصيلة لفائف الاطوار في الجانبين الابتدائي والثانوي.

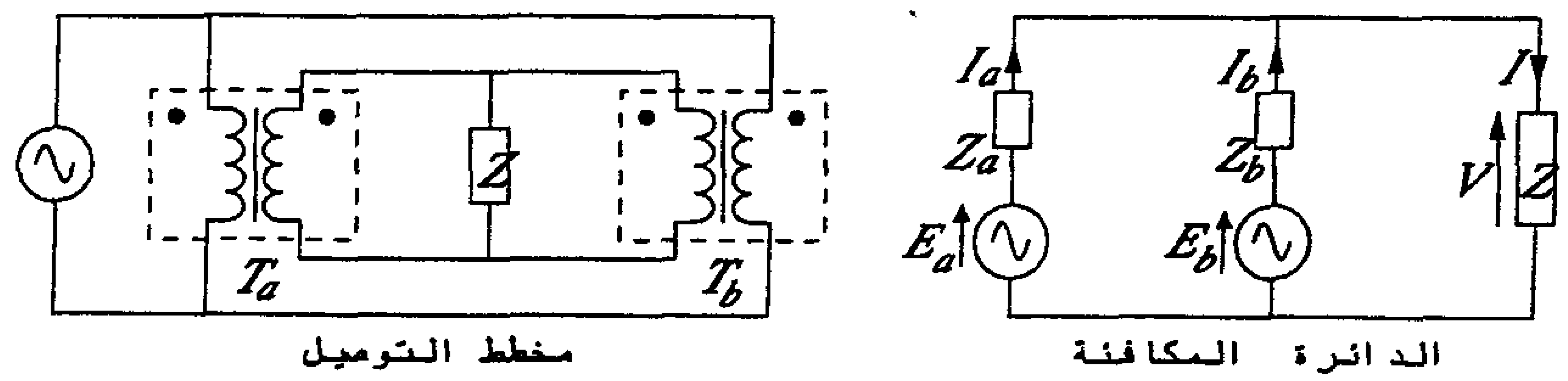
2 - ان يتم توصيل لفائف المحولات بنفس تتابع الاطوار، مع ملاحظة ان اختلاف تتابع الاطوار قد يؤدي الى تدفق تياردوار كبير في لفائف المحولات ويعرضها لمخاطر كبيرة.

3 - ان تكون جهود الخطوط المناظرة منطبقة طورياً، مع ملاحظة ان الازاحة الطورية بين جهد الخط الابتدائي والثانوي تعتمد على هيئة

توصيل اللفائف. ولضمان تحقيق هذا الشرط يجب ان تكون توصيلة لفائف المحولات منتمية الى نفس المجموعة الطورية في الجدول (1).

1.11.2 - التشغيل على التوازي بنسب تحويل متساوية.

عند تشغيل محولين A و B على التوازي لتغذية حمولة مشتركة قدرتها المركبة S تسحب تيار I، يمكن باستخدام الدائرة المكافئة المبسطة للمحول منسوبة للثانوي اثبات ان النسبة بين تيارات الحمولة المتدفقة من المحولين I_a و I_b ومن تم القدرة التي يغذيها كل منهما S_a و S_b ستكون مساوية لعكس النسبة بين معاوقتهما المكافئة منسوبة للثانوي Z_a و Z_b. ويفرض ان الشروط السابقة قد تم تحقيقهما يمكن تمثيل المنظومة بالدائرة المكافئة المبسطة منسوبة للثانوي والمبينة في الشكل (39). ومن قانونا كيرشوف يمكن التعبير عن تيار الحمولة وق.د.ك الثانوية للمحولين E_a و E_b كما يلي:



الشكل (40) ربط المحولات على التوازي.

$$I = I_a + I_b , \qquad S = S_a + S_b = VI \tag{2.106}$$

$$E_a = I_aZ_a + V = I_aZ_a + (I_a+I_b)\, Z \tag{2.107}$$

$$E_b = I_bZ_b + V = I_bZ_b + (I_a+I_b)\, Z \tag{2.108}$$

حيث تمثل الرموز العريضة كميات مركبة عند اختلاف نسبة المقاومة الى المعاوقة لكل من لمحولين، وتمثل القيم المطلقة عند تساوي هذه النسب. واذا كانت نسب التحويل للمحولين متساوية ستكون $E_a=E_b$ وعندها نحصل من المعادلات (2.107) و (2.108) على ما يلي:

$$I_aZ_a = I_bZ_b \qquad (2.109)$$

$$I_aZ_a = (I - I_a)\, Z_b\,, \qquad (I - I_b)\, Z_a = I_bZ_b$$

$$I_a = \frac{IZ_b}{(Z_a+Z_b)}, \qquad I_b = \frac{IZ_a}{(Z_a+Z_b)} \qquad (2.110)$$

ونحصل على حمولة كل محول (S=VI) بضرب طرفي المعادلات (2.110) في الجهد كما يلي:

$$S_a = \frac{SZ_b}{(Z_a+Z_b)}, \qquad S_b = \frac{SZ_a}{(Z_a+Z_b)} \qquad (2.111)$$

2.11.2 – التشغيل على التوازي بنسب تحويل مختلفة.

بالرغم من ان التشغيل الامثل للمحولات على التوازي يتطلب تساوي نسب تحويلها وبما يجعل ق.د.ك جوانبها الثانوية متساوية، فإنه بالامكان تشغيل محولات بنسب تحويل مختلفة على التوازي شريطة ان يكون هذا الاختلاف صغير جداً. ويحدد حجم هذا الاختلاف بحجم التيار الدوار المسموح بتدفقه بين المحولين حتي عند اللاحمل، حيث يمكن السماح بتدفق تيار دوار في حدود 5% من تيار الحمل المقنن دون ان يؤدي ذلك الى الارتفاع الضار في مستويات الحمل والمفقودات للمحولات.

واذا كانت نسب تحويل المحولين A و B المذكورين في الفقرة السابقة مختلفة بمقدار صغير جداً حيث $E_a>E_b$ لا يصح في هذه الحالة تطبيق المعادلات (2.109) الى (2.111) لحساب توزيع الحمولة بين المحولين المتوازين. ويمكن في هذه الحالة التعبير من الشكل (40) عن التيارات المتدفقة من المحولين بحل المعادلتين (2.107) و (2.108) آنياً لنحصل على ما يلي:

$$I_a = \frac{E_aZ_b+(E_a-E_b)Z}{ZZ_a+ZZ_b+Z_aZ_b} \qquad (2.112)$$

$$I_b = \frac{E_b Z_a - (E_a - E_b) Z}{Z Z_a + Z Z_b + Z_a Z_b} \qquad (2.113)$$

وبالتعويض من المعادلتين (2.112) و (2.113) في المعادلة (2.106)

نحصل على التيار الكلي المتدفق في الحمولة والجهد بين اطرافها كما يلي:

$$I = I_a + I_b = \frac{E_a Z_b + E_b Z_a}{Z Z_a + Z Z_b + Z_a Z_b} \qquad (2.114)$$

$$V = I Z = \frac{E_a Z_b + E_b Z_a}{Z_a + Z_b + Z_a Z_b / Z}$$

$$= \frac{E_a / Z_a + E_b / Z_b \cdots}{1/Z + 1/Z_a + 1/Z_b \cdots}$$

$$= \frac{E_a Y_a + E_b Y_b + \cdots}{Y + Y_a + Y_b + \cdots} \qquad (2.115)$$

وتمثل المعادلة (2.115) في الواقع معادلة نظرية ملمان او المولدات المتوازية وهي تمتاز بامكانية تطبيقها على اي عدد من المحولات المتوازية بمجرد اضافة رموز ق.د.ك ومسامحة كل محول في الخانة المناسبة في المعادلة. وبحساب جهد الحمولة من هذه المعادلة يمكن من المعادلات (2.107) و (2.108) الحصول على التيار الذي يغذيه كل محول بشكل ابسط كما يلي:

$$I_a = \frac{(E_a - V)}{Z_a}, \qquad I_b = \frac{(E_b - V)}{Z_b} \cdots \qquad (2.116)$$

وبتفحص المعادلتين (2.112) و (2.113) يتضح ان تيارات المحولين يحتويان على مركبة تمثل التيار الدوار بينهما وتعطي بالعلاقة:

$$I_c = \frac{(E_a - E_b) Z}{Z Z_a + Z Z_b + Z_a Z_b} = \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b + Z_a Z_b / Z} \qquad (2.117)$$

وعند اللاحمل يكون التيار الدوار اكبر ما يمكن ويمكن عندها اختصار المعادلة (2.117) الى:

$$I_c = \frac{(E_a - E_b)}{(Z_a + Z_b)} \qquad (2.118)$$

وعند تساوي نسبة التحويل و ق.د.ك المحولين يمكن بالتعويض عن ($E_a=E_b=E$) في المعادلات (2.112) و (2.113) وقسمتها على المعادلة (2.214) الوصول الى صيغ تيارات المعادلة (2.210).

12.2 – الحالات العابرة في المحولات.

تعود الحالات العابرة في المحولات الى بعض الظواهر غير الاعتيادية والتي من اهمها اندفاع التيار الاولى الناتج عن عمليات وصل وفصل المحول والذي يعرف بالتيار الاندفاعي ويمكن ان تبلغ قيمته الاولية عند وصل المحول بالمصدر بدون حمل اضعاف التيار المقنن ثم يضمحل الى التيار المقنن في جزء من الثانية. كما قد تؤدي عمليات الوصل والفصل واضطرابات شبكة التغذية الى ظهور موجات جهود عارمة (تمورية) تعرّض اطراف اللفائف الى اجهادات كهربائية عالية وخطرة. وقد تتسبب هذه الحالات العابرة في تعرض بنية ولفائف المحول الى اجهادات ميكانيكية وحرارية عابرة عالية جداً قد تصل قيمها الى حد يجعلها قادرة على تدمير المحول.

1.12.2 – التيار الاندفاعي.

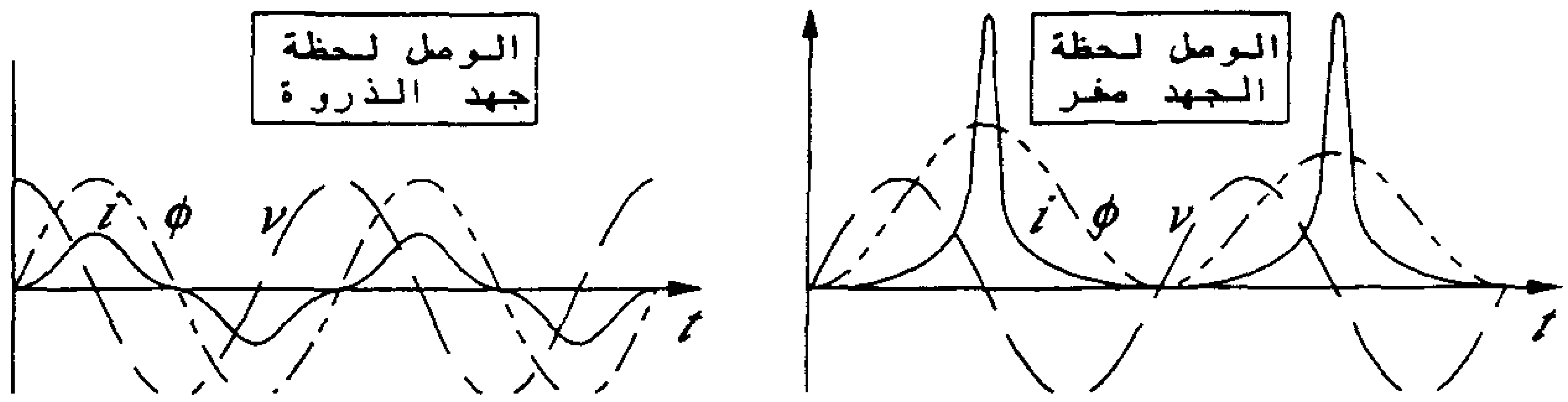
بينما لايتجاوز تيار الاثارة في الحالة الاعتيادية حوالى 5% من تيار الحمولة المقنن، فقد يبلغ تيار الاثارة المندفع لحظة وصل المحول بالمصدر ولفترة عابرة قيم خطرة، خاصةً اذا كان المحول غير محمّل. وتكتسب معرفة هذا التيار الضخم اهمية كبرى لدوره في تحديد الاجهادات الميكانيكية التي قد تتعرض لها لفائف المحول، كما يجب اخذه في الحسبان عند تصميم انظمة حماية المحول. وتعتمد الذروة الاولى للتيار

الاندفاعي على القيمة اللحظية لجهد المصدر لحظة وصل المحول به، اضافةً الى مقدار واتجاه المغناطيسية المتبقية لحظة الوصل وخاصية التشبع المغناطيسي للب المحول.

فاذا كان لب المحول خالي من أي مغناطيسية متبقية لحظة الوصل وكان جهد المصدر ذو دالة جيبية كما يعطى بالمعادلة (2.1) وباهمال مقاومة اللفائف وفقد اللب يمكن من قانون فرداي التعبير عن الفيض الناشئ بتكامل دالة الجهد. وفي هذه الحالة شبه المثالية سيكون الفيض كذلك ذو دالة جيبية ولكنه يتأخر $90°$ عن الجهد وكما يعطى بالمعادلة (2.6). وبالطبع سيكون هذا الفيض منطبقاً طورياً على تيار المغنطة الذي يتأخر بالمثل $90°$ عن الجهد المسلط على الملف.

وسيحثت الفيض وفقاً لمعدل تغيره ق.د.ك الملف اللازمة لمعادلة جهد المصدر ($e \propto d\phi/dt$) حيث يضمن تأخر الفيض $90°$ عن الجهد تحقيق التوازن المطلوب بين الجهد وق.د.ك لحظة بلحظة. ولذلك يمر الفيض بالصفر لحظة مرور الجهد بذروته حيث يكون معدل تغير الفيض اكبر ما يمكن، ومن تم تكون ق.د.ك المحثثة في ذروتها عند هذه اللحظة. وفي المقابل يكون الفيض عند ذروته لحظة مرور الجهد بالصفر ليكون معدل تغير الفيض وق.د.ك المحثثة صفراً في هذه اللحظة.

وفي حالة وصل المحول بالمصدر لحظة جهد الذروة سيبدأ تيار الاثارة في بناء الفيض من الصفر وبأكبر معدل تغير ممكن لحظة الوصل ليكون تغير الجهد والفيض كما هو مبين في الشكل (41). ويتضح من الشكل (41) ان تغير الجهد والفيض في هذه الحالة يماثل تماماً الحالة الثابتة ويتفق مع المعادلتين (2.1) و (2.6) وسيصل تيار الاثارة قيمته الثابتة فوراً دون المرور بمرحلة عابرة.



الشكل (41) الشكل الموجي للتيار الاندفاعي.

واذا تم تسليط الجهد الجيبي لحظة مروره بالصفر، وحيث الفيض المتبقي صفراً، فإن ق.د.ك المعادله للجهد يجب ان تكون موجبة طوال نصف الدورة الاول مما يلزم الفيض ان يصعد طوال هذه الفترة بمعدل كلي مماثل لنصف الدورة العادية. ولمعرفة ذروة الفيض في هذه الحالة يمكن التعبير عن دالة الاستجابة الكاملة للفيض باضافة ثابت التكامل A للمعادلة (2.5) وكما يلي:

$$\phi = -\Phi_{max} \cos\omega t + A \qquad (2.120)$$

ويمكن الحصول على A من الشروط الحدية استناداً الى الجهد حيث يتضح في الحالة الثابتة ان $\phi=0$ عند $\omega t=\pi/2$ وهو ما يجعل A=0 في هذه الحالة وكما في المعادلة (2.6). اما في حالة الوصل لحظة الجهد صفر فإن $\phi=0$ عند $\omega t=0$ وهو ما يجعل $A=\Phi_{max}$ لتصبح المعادلة كما يلي:

$$\phi = \Phi_{max}(1 - \cos\omega t) \qquad (2.121)$$

وتبين المعادلة (2.121) ان ذروة الفيض الناتج عن تسليط الجهد الجيبي لحظة الصفر تحدث عند عودة الجهد للصفر ($\omega t=\pi$) وتبلغ $2\Phi_{max}$ أي ضعف ذروته العادية فيما يعرف بتأثير المضاعفة وكما في الشكل (41). واذا كان الفيض المتبقي في اللب Φ_r لحظة الوصل فإن الذروة الاولى للفيض الكلي ستبلغ ($2\Phi_{max2}+\Phi_r$). وتؤدي مضاعفة الفيض وكثافته العظمى الى تشبع اللب مما يتطلب زيادة الاجهاد ومن تم تيار

المغنطة الاندفاعي الى ذروة حادة قد تصل مئتي ضعف ذروته الاعتيادية او عشرة اضعاف التيار المقنن مقارنة بحوالى 5٪ في الحالة الاعتيادية.

ويجدر بالذكر ان ذروة التيار الاندفاعي تقل كل ما بعد الجهد عن الصفر في لحظة الوصل لتصل القيمة الاعتيادية لتيار الاثارة اذا تم الوصل لحظة الذروة. وقد يخل التيار الاندفاعي بوظيفة مرحلات ارتفاع التيار والحماية التفاضلية. وعملياً قد لا يتمكن الفيض من المضاعفة بسبب هبوط الجهد والفقد في معاوقة المحول وشبكة التغذية اضافة الى فقد الحديد وكلها تحد من قيمة التيار الاندفاعي.

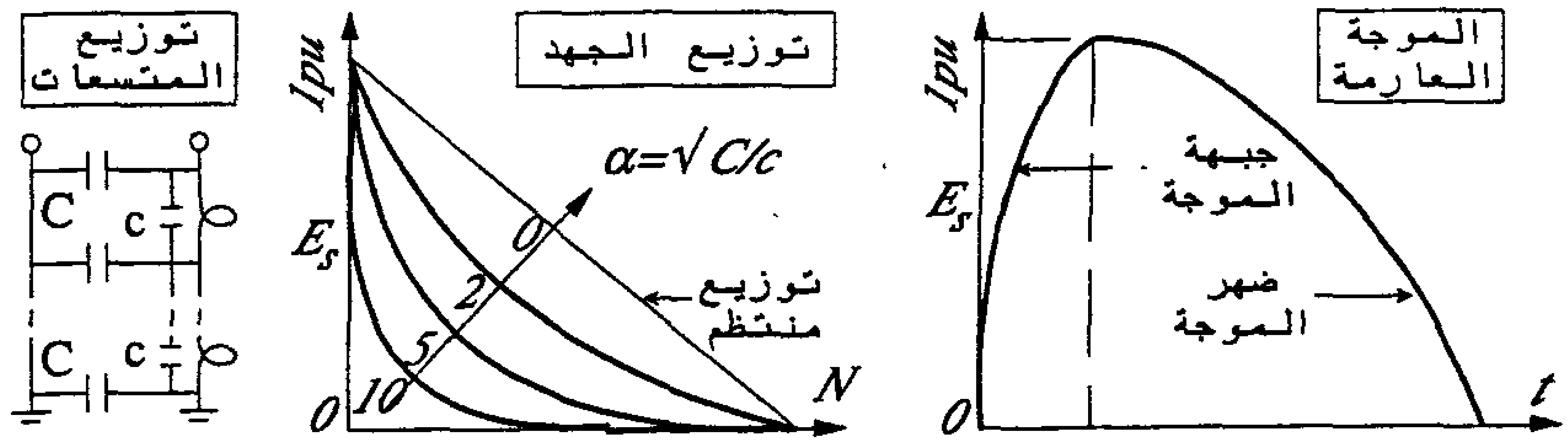
ويجب تصميم المحول لتحمّل الاجهادات الميكانيكية التي تحدثها القوى الكهرومغناطيسية الناتجة عن التيار الاندفاعي والتي تتناسب مع مربعه. ويلاحظ ان المحولات ثلاثية الطور دائمة التعرض للتيار الاندفاعي حيث لايمكن ان يكون جهد كل الاطوار صفراً لحظة الوصل.

2.12.2 – الجهود العارمة.

تنتج الجهود العارمة عن عمليات الوصل والفصل والاعطاب والصواعق في خطوط النقل والتي تحدث موجات ترحل عبر الخطوط بسرعة الضوء تقريباً تصطدم باطراف توصيل المحول. وتتميز موجة الجهد العارم بذروة وتردد عاليين وجبهة حادة كما في الشكل (41). ويبلغ معدل ارتفاع جهدها مئات اضعاف معدل جهد التردد الاساسي مما يعرض عوازل اطراف المحول لاجهادات خطرة.

وبينما تهمل متسعات المحول عند التردد الاساسي لصغر قيمها، فهي تلعب دور اساسي في توزيع الجهود العارمة والحد منها. ويعود ذلك الى ان المفاعلة السعوية ستكون صغيرة جداً مقارنةً بالمقاومة والمفاعلة الحثية عند التعرض للجهود العارمة ذات التردد العالي. ويتوقف توزيع موجات الجهود العارمة عبر لفائف الجهد العالي على المتسعات المتوالية C بين اللفات

والمتسعات المتفرعة C بينها وبين الارض والتي يمثلها لفائف الجهد المنخفض واللب والوعاء. ويمكن نمذجة المحول في هذه الحالة بشبكة المتسعات المبينة في الشكل (42) حيث تزداد حدة جبهة الموجة العارمة بزيادة $\alpha=\sqrt{(C/c)}$.



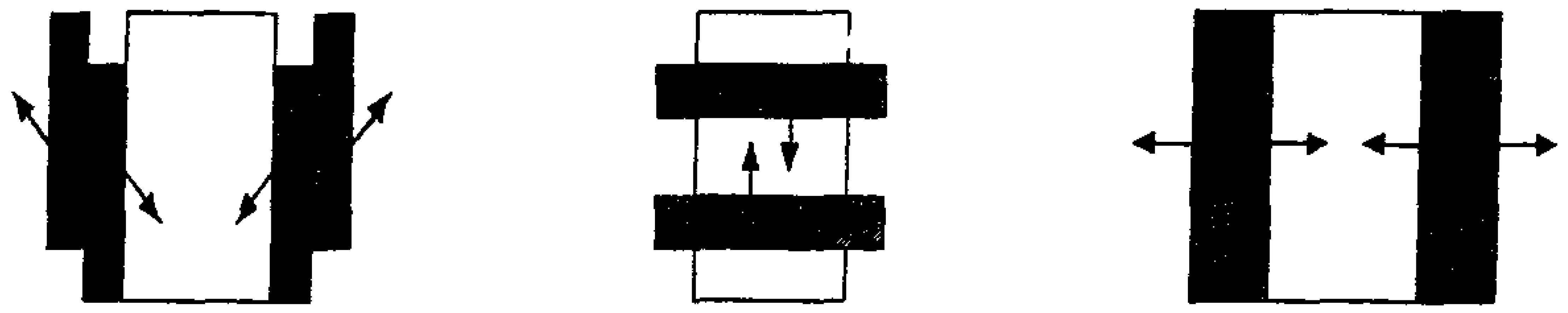
الشكل (42) الشكل الموجي للجهد العارم وتوزيعه.

وتتسبب حدة جبهة الموجة العارمة في حدة الاجهاد على لفات الملف عند طرف التوصيل بجوار اللفة 0 ليقل باتجاه اللفات الابعد بجوار اللفة N. وسيعرض ذلك عوازل اللفات الطرفية لاجهادات تفوق الاجهاد الاعتيادي بمئات المرات متسببةً في انهيارها، كما في الشكل (42). وللحد من الجهد العارم تستخدم وسائل تنظيم توزيع الاجهاد على اللفائف مثل تداخل هذه اللفائف لجعل $\alpha\rightarrow 0$. ولن تفيد تقوية عزل اللفات الطرفية لكونها تقلل c وتزيد α. كما تستخدم معدات امتصاص الجهد العارم مثل محاثات التوالي عند نهاية خط النقل المتصل بملف الجهد العالي لتقليل حدة جبهة الموجة.

3.12.2 – الاجهادات الميكانيكية.

ينشئ تيار الثانوي ومركبته في الابتدائي ق.د.م متساوية ومتضادة ومتعادلة فيما يخص الفيض المتبادل خلال اللب، و ق.د.م تدعم بعضها البعض في الحيز بينهما فيما يخص الفيض المتسرب منهما. وينتج الفيض الاخير للقوى الميكانيكية المؤثرة على لفائف المحول والتي تكون صغيرة نسبياً في الحالات الاعتيادية وتتضاعف مئات المرات في الحالات العابرة مثل حالات القصر والتيار الاندفاعي، وتولد اجهادات ميكانيكية ضخمة يجب اخذها

في الاعتبار عند تصميم المحول. وتتوقف اتجاهات القوى الميكانيكية على اتجاه تيارات اجزاء اللفائف ويمكن تصنيفها كما في الشكل (43) الى:



وى القطرية قوى الشد المحورية قوى الطرد المحورية

الشكل (43) القوى الميكانيكية المؤثرة على الملفات.

1 – القوى القطرية التي تحاول خلع اللفائف الخارجية وعصر اللفائف الداخلية في الملفات متحدة المركز على سبيل المثال. وهي تعود للمركبة المحورية للفيض المتسرب في الحيز بين اللفائف.

2 – قوى الشد المحورية في اللفائف المتماثلة وتعمل في اتجاه المحور على عصر اللفائف سويةً كما في اللفائف الشطيرية على سبيل المثال. وهي تعود للمركبة القطرية للفيض المتسرب بين اللفائف.

3 – قوى الطرد المحورية في اللفائف غير المتماثلة وتعود لعدم تماثل الملفات من حيث ترتيبها او طولها، والذي يؤثر على توزيع الفيض المتسرب بين اللفائف، وتنتج عنه قوى طرد مائلة في اتجاه يجعلها تزيد من عدم التماثل. وهي تنقل مباشرة الى الدعائم الخارجية ومعدات تثبيت اللفائف.

13.2– محولات اجهزة القياس والاتصالات.

نادراً ما تتجاوز مقننات اجهزة القياس (instruments)والتحسس (sensors) الكهربائية عشرات الامبيرات او مئات الفولتات. ويعود ذلك الى اعتبارات السلامة والعوامل الاقتصادية والتقنية التي تجعل من غير الملائم تصميم اجهزة بمقننات اكبر من ذلك. وفي دوائر التيار المتناوب قد يتطلب استخدام هذه الاجهزة تغذيتها بواسطة محولات لتحويل الكميات المقاسة الى

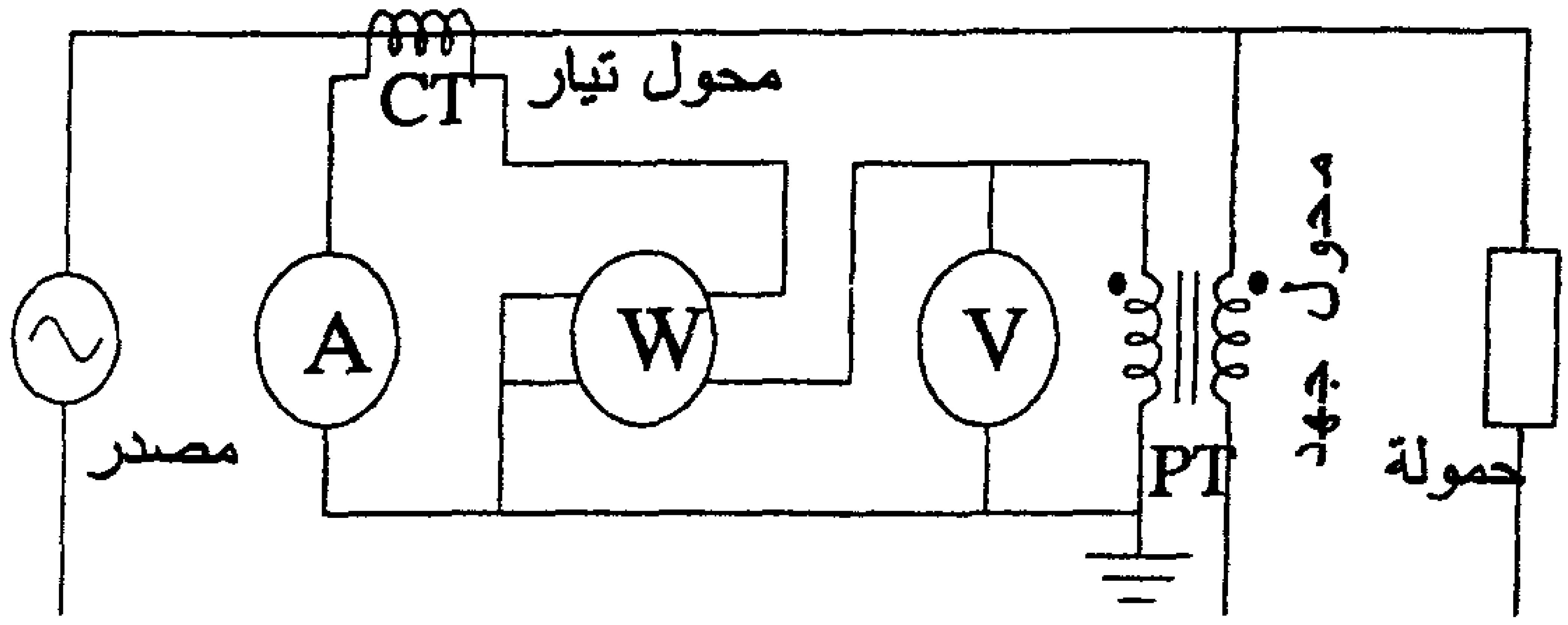
قيم ملائمة، خصوصا عندما تدعو الحاجة الى قياس الجهود العالية والتيارات الضخمة في منظومة القوى الكهربائية. وفي هذه الحالة يحمل الملف الابتدائي للمحول التيار او الجهد المطلوب قياسه او تحسسه بينما يوصل جهاز القياس او التحسس بالملف الثانوي ليقيس او يراقب تيار او جهد صغير يتناسب مع القيمة الفعلية في الدائرة الرئيسية. **وبصفة عامة تحقق محولات اجهزة القياس(instruments transformers)التي تنقسم الى محولات الجهد ومحولات التيار العديد من المزايا اهمها:**

1 - يمكن بتخفيض الجهد او التيار استخدام اجهزة صغيرة الملفات بسيطة العزل تكون آمنة وسهلة للتناول والاستعمال.

2 - يعزل المحول اجهزة القياس ويحميها من التأرجحات العابرة والخطرة التي قد تتولد في شبكة القوى لاسباب متنوعة.

3 - يمكن باستخدام محولات الاجهزة توحيد مواصفات ومدى اجهزة القياس والتي عادة ماتكون 110 فولت او 5 امبير.

ويبين الشكل (44) مثال لاستخدام محولات الجهد والتيار لتغذية فولتمتر واميتر وملفي الجهد والتيار لواتمتر في منظومة قياس. ولايختلف محول الجهدtransformer) (potential كثيراً في تركيبه وادائه عن محول القوى الاكبر منه في المقنن والحجم. وهو عادة ما يستخدم لتغذية جهاز فولتمتر اوملف الجهد للواتمتر او مقياس الطاقة حيث عادة مايكون الخطأ في نسبة التحويل)نتيجة لهبوط الجهد في معاوقة المحول(والازاحة الطورية)نتيجة لتيار الاثارة بين جهد الابتدائي والثانوي صغيراً ومهملاً. ويختلف الامر كثيراً في محول التيار(current transformer) كما سيتضح لاحقاً.



شكل (44) استخدام محولات اجهزة القياس

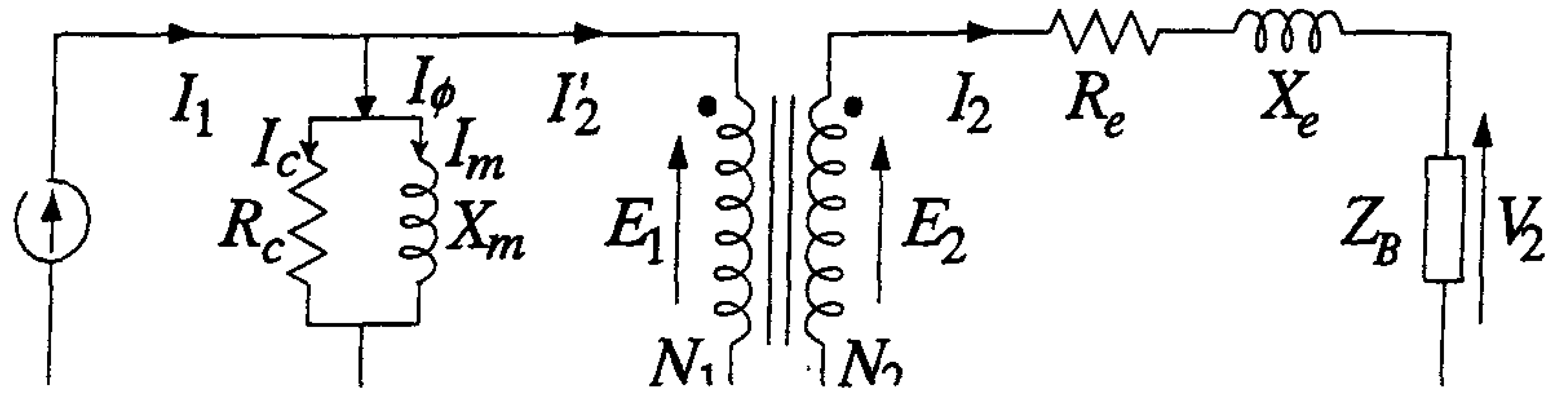
1.13.2– محولات التيار

في محول التيار يجب ان تكون لفات الجانب الابتدائي الذي يوصل على التوالي مع الدائرة الرئيسية اقل مايمكن حتى لايتسبب المحول في هبوط جهد كبير في الدائرة الرئيسية. وفي المقابل يكون عدد لفات الملف الثانوي كبيراً لخفض التيار الذي يمكن ان يغذى به اميتر او ملف التيار للواتمتر اومقياس الطاقة)مقياس الوات-ساعة(. وتتم معايرة الاميتر ويختار تدريجة بحيث تدل قراءته على تيار الدائرة الرئيسية مباشرة. وعند قياس التيارات الضخمة قد يكتفى في الابتدائي بلفة واحدة على شكل قضيب يحيط به لب حلقي يلف حوله الملف الثانوي فيما يعرف بمحول التيار ذو الابتدائي القضيبي (primary-bar). اما في المحولات ذات التيار الابتدائي المنخفض فإن الحصول على اقتران مغناطيسي افضل بين الجانبين ودقة اكبر في التحويل بينهما يتطلب استخدام لفائف اعتيادية في الجانب الابتدائي. ويشار الى المعاوقة الاومية الكلية للحمولة عند حملها للتيار المقنن بمعامل القدرة المقنن بالعبء (burden)، ويعبر عن مقنن القدرة بمضروب مربع تيار الثانوي في العبء.

ونظراً لصغر عبء المحول كما هو الحال في العادة يمكن النظر الى الجانب الثانوي على انه يعمل في حالة قصر متواصلة. وفي محول القوى لن

يتدفق تيار يذكر في الابتدائي الا عند التحميل وتدفق تيار الثانوي مما يبقى على ثبوت ق.د.م في اللب. اما في محول التيار فإن تيار الدائرة الرئيسية سيتدفق في الابتدائي بغض النظر عن كون الحمل موصل بالثانوي ام لا. وفي هذه الحالة يعتبر تدفق تيار الثانوي ضروريا لموازنة ق.د.م الابتدائي وهو ما لن يتحقق اذا كان الثانوي مفتوحا. وسيؤدي ذلك الى ظهور محصلة ق.د.م ضخمة في اللب نتيجة لتدفق تيار الدائرة الرئيسية بشكل مستقل لمغنطة اللب. وقد يؤدي ذلك الى تشبع اللب وارتفاع مفقوداته وهو ما يعرضه الى اجهادات ميكانيكية ضخمة وارتفاع خطر في درجة حرارته، اضافة الى توليد جهود عالية خطره بين اطراف الثانوي. ولذلك يجب ان لا يترك الثانوي مفتوحا على الاطلاق عند تدفق التيار في الابتدائي، وهو ما يتطلب قصر اطراف الثانوي اذا اريد اخراج الحمولة مؤقتاً دون فصل تيار الدائرة الرئيسية.

وفي محول التيار المثالي تكون نسبة تحويل تيار الابتدائي/الثانوي مساوية بدقة نسبة عدد لفات الثانوي/الابتدائي وكذلك تكون تيارات الجانبين متعاكسة تماماً في اتجاهاتها الطورية. ولكن الامر ليس كذلك في محول التيار الحقيقي حيث تختلف نسبة تحويل التيار قليلاً عن نسبة اللفات كما تختلف الازاحة الطورية بين تيار الجانبين قليلاً عن التعاكس. وتعود هذه الاختلافات التي يعبر عنها بخطأ نسبة التحويل (ratioerror) وخطأ زاوية الطور (phase-angleerror) اساساً الى تيار الاثارة اللازم لمغنطة اللب وتغذية مفقوداته، كما يتضح من الدائرة المكافئة والمخطط الطوري لمحول التيار المحمل والمبينين في الشكل (45). ولعل اهم المسائل التي يجب معالجتها باهتمام عند تصميم محول التيار هي حصر هذه الاخطاء ضمن نطاق محدد يتفق ومعدل عبء المحول مع ملاحظة ان تيار الابتدائي هو متغير مستقل يستوجب ضبط بقية الكميات لتتلائم معه.



شكل (45) تمثيل محول التيار

ومن الواضح من الشكل (45)ان خطأ نسبة التحويل $(I_1-I'_2)/I_1$ وخطأ زاوية الطور ϕ يعتمدان كلياً على مقدر وازاحة تيار اللاحمل ϕ Iالضروري لانشاء الفيض والذي يمكن الحد منه باستخدام لب من مادة عالية النفاذية. وجذير بالذكر ان هذه الاخطاء المتغيرة مع الحمل تلعب دور مهم في انظمة الحماية التفاضلية التي تقوم على مقارنة التيار الداخل الى والخارج من الجزء المحمي، حيث قد تتجاوز هذه الاخطاء الحد الذي يجعلها تتسبب في التشغيل الزائف للنظام الذي يغذي بمحولات التيار.

2.13.2 – محولات التردد العالي.

ويكمن العيب الرئيسي للب الحديدي في الفقد الناتج عن تعرضة لمجال مغناطيسي متناوب والمتمثل في فقد التخلف المغناطيسي وفقد التيار الدوامي.

وتزداد قيمة هذه الفقودات بشكل كبير مع زيادة تردد المصدر مما يؤدي الى عدم جدوى استخدام اللب الحديدي في المحولات المستخدمة في انظمة التردد العالي. ولذلك عادة ما يصنع لب محولات التردد العالي المستخدمة في انظمة الاتصالات من مادة غير مغناطيسية مثل الهواء حيث يسمى هذا النوع بالمحول ذو اللب الهوائي.

يميز المحولات (محولات الجهد)المستخدمة في انظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية بتغير التردد الذي تعمل عنده هذه المحمولات من جزء

من الهيرتز الى مئات الميجا هيرتز. ولعل اهم المسائل التي يجب على مصمم هذه المحولات التعامل معها هي كون مفقودات الحديد التي تنتج في اللب الحديدي اضافة الى مفاعلات المغنطة والتسرب تعتمد كثيراً على التردد. ونظراً لان فقد التيار الدوامي يتناسب مع مربع التردد فهو يكتسب اهمية خاصة في الوسائل المتبعة لتخفيض فقد اللب. ففي معدلات التردد المتوسطة) في حدود مئات الهيرتزات(يمكن خفض فقد التيار الدوامي بتقليل سمك شرائح اللب واستخدام مواد تمتاز بفقد تيار دوامي صغير وجودة مغناطيسية مقبولة مثل بعض سبائك غبار واكاسيد الحديد. وفي حالة ثبوت تردد الاستخدام عند قيم فائقة فقد يفضل الاستغناء نهائياً عن الحديد واستخدام الباب هوائية لمنع فقد اللب الضخم في هذه الحالات.

وفي محولات التردد المتغير تتفاوت اهمية معاملات الدائرة المكافئة للمحول تبعا لمعدل التردد. فعند الترددات المنخفضة جداً على سبيل المثال يهمل تأثير مفاعلة التسرب وقد تنخفض مفاعلة المغنطة (الموازية) الى حد يجعلها تقصر الحمولة وتتسبب في انخفاض جهد الثانوي بشكل كبير. وفي معدلات التردد المتوسطة قد تصبح مفاعلة المغنطة كبيرة الى حد يجعل تأثيرها مهملاً بينما تمتص مفاعلة التسرب جزء يسير من جهد التغذية. ومع ارتفاع التردد في النطاق العالي تهمل مفاعلة المغنطة كلياً بينما قد تبلغ الزيادة في مفاعلة التسرب حد يجعلها تتسبب في انخفاض كبير في جهد الثانوي مرة ثانية. وعند الترددات العالية لايمكن اهمال المتسعات بين لفات اللفائف وبين اللفائف والارض لكون هذه المتسعات الموزعة موازية للمحاثات وقد تتسبب في سلوك يشبه الحمولات السعوية. ولذلك ستكون احد اهم مشاكل التصميم في هذه الحالات التأكد من تحويل الاشارات ذات الترددات المركبة من الابتدائي الى الثانوي دون ان يتجاوز التشوه المحتمل فيها الحد المقبول.

2.17 - امثلة محلولة.

1- محول مثالى نسبة عدد لفاته 27.5 اوصل ملفه الابتدائى ذو الـ 4000 لفة بمصدر تردده 50 Hz. احسب جهد المصدر اللازم لانتاج فيض مغناطيسى قيمته العظمى 2 mWb فى لب المحول، و ق.د.ك الملف الثانوى. [1777.2 V, 64.6 V]

الحل:

$N_1 = 4000t$, $a = 27.5$, $f = 50$ Hz , $\phi = 2mWb$, $V_1 = ?$, $E_2 = ?$

$E_1 = 4.443 * \phi * N_1 * f$

$V_1 = E_1 = 4.443*2*10^{-3}*4000*50 = 1777.2$ v

$E_1 / E_2 = a$ → $E_2 = E_1 / a = 1777.2/27.5 = 64.62$ v

2- محول مثالى مقنناته 4.6 KVA ، 2300/115 V ، 50 Hz صمم ليكون الفيض الناشئ فى لبه 11.25 mWb. احسب ق.د.ك المحثثة فى كل لفة وعدد لفات الملفين الابتدائى والثانوى ومقنن تيارهما. [2.5 V, 920 t,46 t, 2 A, 40 A]

الحل :

$S = 4.6$ KVA, $a = V_1/V_2 = 2300/115 = 20$, $f = 50$ Hz , $\phi = 11.25$ mWb

$E_1 = ?$, $E_2 = ?$, $N_1 = ?$ $N_2 = ?$, $I_1 = ?$, $I_2 = ?$

$E = 4.443*\phi*N*f = 4.443*11.25*10^{-3}*50*N = 2.5\ N$ V

$V_1 = E_1 = 4.443*\phi*N_1*f \rightarrow N_1 = V_1/4.443*\phi*f$

$N_1 = 2300/4.443*11.25*10^{-3}*50 = 920$ t

$a = N_1/N_2 \rightarrow N_2 = N_1/a = 920/20 = 46$ t.

$I_1 = S/V_1 = 4.6*10^3/2300 = 2$ A

$I_1/I_2 = N_2/N_1 \rightarrow I_2 = a\ I_1 = 20*2 = 40$ A.

3- محول مثالى نسبة لفاته 50 اوصل ملفه ذو الجهد المنخفض على التوالى مع ملف مفاعلته 24 Ω بمصدر جهده 20 V وادخلت حمولة معاوقتها (30-j40) KΩ بين طرفى ملفه ذو الجهد العالى. احسب الجهد عبر معاوقة الحمولة والتيار المسحوب من المصدر. [1 KV, 1 A]

4- محول مثالى رافع ذو 90/2250 لفة اوصل بمصدر جهده 220 V وتردده 50 Hz لتغذية حمولة 8.8 KW معامل قدرتها 0.8 متأخر. احسب التيار المسحوب من المصدر والقيمة العظمى لفيض اللب. اهمل تيار الاثارة. [50A, 11 mWb]

5 - محول مثالى مقنناته 200 KVA، 6600/440 V، 50 Hz. احسب مقننات المحول اذا شغل عند 25 Hz على فرض ان كثافة الفيض خلال اللب ستزداد عن قيمتها الاصلية بنسبة 10%. [110 KVA, 3630/242 V]

6 - محول مقنناته 1 KVA، 220/110 V، 400 Hz. فاذا كانت مفقودات لب المحول تتناسب مع التردد ومربع الفيض وكانت فى الاصل 10 W احسب تلك المفقودات عند مقنن الجهد الاصلى وتردد 50 Hz. [80 W]

7 - محول خافض مقنن جهده 110/440 V يسحب تيار قدره 1.5 A بمعامل قدرة 0.2 متأخر عند اللاحمل. احسب التيار المسحوب من المصدر اذا كان تيار الحمولة 120 A ومعامل قدرته 0.8 متأخر. [31.14 A]

8 - محول خافض مقنناته 128.8 KVA، 6440/230 V، 50 Hz يسحب تيار قدره 0.5 A بمعامل قدرة 0.28 متأخر عند اللاحمل. احسب تيار الابتدائى عند تحميل المحول بنصف الحمولة الكاملة بمعامل قدرة 0.8 متأخر. كذلك احسب مقننات المحول عند تشغيله

فى نظام تردده 60 Hz بفرض نقص الفيض بنسبة 6.25%. [10.4 A, 144.9 KV, 7245/258.75 V]

9 - محول خافض مقنناته 500 KVA، 2300/230 V، 50 Hz مفاعلة التسرب لملفيه الابتدائى والثانوى 0.3 Ω و 0.003 Ω على الترتيب، ومقاومتهما 0.1 Ω و 0.001 Ω على الترتيب. احسب مقنن تيار الملفين الابتدائى والثانوى والمعاوقة المكافئة للمحول منسوبة لكلا الملفين، وتيار الملف الابتدائى اذا كانت الحمولة مقاومة قدرها 0.1 Ω. اهمل تيار الاثارة. [217.4 A, 2174 A, (0.2+j0.6) Ω, (0.002+j0.006) Ω, 225.1V]

10- محول خافض مقنناته 10 KVA، 4000/400 V ومقاومات ملفيه الابتدائى والثانوى 13 Ω و 0.15 Ω على الترتيب ومفاعلة التسرب المكافئة منسوبة الى الملف الابتدائى 45 Ω، ومفاعلة المغنطة 6 KΩ ومقاومة مفقودات اللب 12 KΩ. احسب المقاومة المكافئة منسوبة الى الملف الابتدائى والتيار الذى يسحبه المحول عند اللاحمل وعند الحمل الكامل بمعامل قدرة 0.8 متأخر. [28 Ω, 0.745 A, 3.18 A]

11- محول قدرة ذو 50/500 لفة معاوقات ملفيه الابتدائى والثانوى (70+j4) Ω و (0.8+j0.04) Ω على الترتيب، ويغذى حمولة 8 KW معامل قدرتها 0.8 متأخر عند جهد 200 V. احسب ق.د.ك المحتثة فى كل من الملفين وجهد الملف الابتدائى. اهمل تيار الاثارة. [2277 V, 227.7 V, 2548 V]

12- محول قدرة ذو 90/480 لفة متوسط طول مسار الفيض فى لبه الحديدى 180 cm وتمثل وصلات فكى اللب بالسيقان ثغرة هوائية طولها 0.1 mm. فاذا كانت القيمة العظمى لكثافة الفيض 1.1 T عند تطبيق جهد 2200 V بتردد 50 Hz على ملف الجهد العالى، احسب: (أ) مساحة مقطع اللب؛ (ب) جهد الملف الثانوى عند اللاحمل؛

(ج) قيمة ومعامل قدرة تيار الملف الابتدائى عند اللاحمل. افترض ان النفاذية النسبية لحديد اللب 2188.4 وكثافته النوعية 7800 Kg/m3 وفقد الحديد 1.7 W/Kg. [0.1186 cm2, 412.5 V, 1.19 A, 0.17 lag]

13- محول مقنناته 100 KVA، 1000/200 V نتائج اختباراته 200 V، 10 A، 1 KW لاختبار اللاحمل عند جانب الجهد المنخفض؛ 100 V، 100 A، 2 KW لاختبار القصر عند جانب الجهد العالي. احسب قيم معاملات الدائرة المكافئة التقريبية منسوبة الى: (أ) ملف الجهد العالى؛ (ب) ملف الجهد المنخفض. [(0.2+j0.98) Ω, (1//j0.577) KΩ, (8+j3.9) mΩ, (40//j23.09) Ω]

14- محول رافع مقنن جهده 440/110 V ومقاومة ملفيه الابتدائى والثانوى 0.02 Ω و 0.32 Ω على الترتيب. فاذا كان المحول يسحب 150 W عند اللاحمل احسب الكفاءة القصوى للمحول عند تغذيته لحمولة معامل قدرتها الوحدة. [95.74%]

15- محول قدرته 100 KVA تحدث كفائته القصوى عند 75% من الحمل التام وتبلغ كفائته عند الحمل التام 98.16%. فأذا كان معامل قدرة الحمل 0.8 متأخر فى جميع الاحوال، احسب كل من فقد الحديد وفقد النحاس فى المحول عند الحمل التام وكفائته القصوى والكفاءة عند نصف الحمل. [0.54 KW, 0.96 KW, 98.23%, 98.09%]

16- محول توزيع مقنناته 500 KVA، 2300/208 V يسحب عند اللاحمل 1.8 KW، ويسحب عند قصر الملف الثانوى وامرار التيار المقنن 8.2 KW. احسب الكفاءة اليومية للمحول اذا كانت دورة تحميل المحول خلال اليوم كما يلى: لاحمل لساعتين؛ حمل 20% م.ق 0.7 لاربعة ساعات؛ حمل 40% م.ق 0.8 لاربعة ساعات؛ حمل 80%

م.ق 0.9 لستة ساعات؛ حمل 100% م.ق 1.0 لستة ساعات؛ حمل 125% م.ق 0.85 لساعتين. [97.87%]

17- محول انارة قدرته 60 KVA موصل بالمصدر بشكل متواصل ومعامل قدرة حمولته دائما الوحدة. فأذا كانت الكفاءة القصوى 96% وتحدث عند الحمولة الكاملة، احسب الكفاءة اليومية للمحول اذا كانت دورة تحميله خلال اليوم الكامل هى: 6 ساعات حمل كامل؛ 6 ساعات حمل 80%، 6 ساعات حمل 60%، 6 ساعات بدون حمل. [95.05%]

18- محول قدرة خافض مقنناته 165 KVA، 3300/220 V ومعاوقات ملفيه الابتدائى والثانوى Ω (2.25+j1.125) و Ω (0.01+j0.005) على الترتيب. فاذا كان المحول يغذى حمولة معامل قدرتها 0.8 متأخر، احسب تنظيم جهده. [6.82%]

19- محول احادى الطور ذو 80/400 لفة مقنن قدرته 100 KVA ومعاوقات ملفيه الابتدائى والثانوى Ω (1.1+j0.3) و Ω (0.035+j0.01) على الترتيب. فاذا كان المحول يغذى من مصدر جهده 2200 V، احسب تنظيم جهد المحول جهد الملف الثانوى عند حمولة كاملة ذات معامل قدرة: (أ) 0.8 متأخر؛ (ب) 0.8 سابق. [3.36%, -1.54%]

20- محول احادى الطور مقنناته 10 KVA و 400/200 V اعطى نتائج الاختبار التالية: اختبار اللاحمل 200 V و 1.3 A و 100 W عند جانب الجهد المنخفض؛ اختبار القصر 17 V و 25 A و 125 W عند جانب الجهد العالى. احسب ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية للمحول منسوبة الى جانب الجهد العالى ومعامل تنظيم جهده عند معامل قدرة: (أ) 0.8 متأخر، (ب) 0.8 سابق. [(0.2+j0.65) Ω, (1.6//j1.0) KΩ, 3.4375%, -1.4375%]

21- محول احادى الطور خافض مقنناته 132 KVA ، 6600/220 V ، 50 Hz ومقاومة ملفيه الابتدائى والثانوى 1.8 Ω و 0.002 Ω على التوالى يتطلب تطبيق 222 V على الابتدائى لامرار التيار المقنن كاملا عند قصر الثانوى. احسب تنظيم الجهد وجهد الثانوى عند حمولة كاملة معامل قدرتها : (1) 0.8 متأخر؛ (2) 0.8 سابق؛ (3) الواحد الصحيح. ما هو معامل قدرة الحمولة اذا كان تنظيم الجهد صفرا. [2.78%, 213.9 v; -1.04%, 222.3 V; 1.09%, 217.6; 0.946 lead.]

22- محول احادى الطور مقنناته 5 KVA ، 1000/250 V اعطى نتائج الاختبارات التالية عند ملف الجهد المخفض: اختبار اللاحمل 250 V ، 0.51 A ، 31.25 W؛ اختبار القصر 7.9 V ، 20 A ، 50 W. احسب كفاءة المحول وتنظيم جهده عند الحمل الكامل بمعامل قدرة الواحد الصحيح. [98.4%, 1%]

23- محول احادى الطور خافض مقنن جهده 240/24 V ومعاوقة ملفيه الابتدائى والثانوى (6+j20) Ω و (0.05+j0.18) Ω على الترتيب، يسحب تيار قدره 0.02 A بمعمل قدرة 0.3 متأخر عند اللاحمل. فأذا كان المحول يغذى حمولة معاوقتها (3.9+j1.9) Ω ، احسب: (1) التيار المسحوب من المصدر؛ (2) تنظيم الجهد وكفاءة المحول. [0.54 A, 6%, 96%]

24- محول ذو ملفين مقنناته 10 KVA ، 1200/120 V تم توصيله كمحول ذاتى مقنن جهده 1320/1200 V. احسب القدرة المنقولة بالتوصيل والقدرة المنقولة بالتحويل ونسبة الزيادة فى مقنن القدرة ونسبة التوفير فى كمية النحاس اذا كان المحول الذاتى: (ا) خافض؛ (ب) رافع. ارسم دائرة المحول وبين عليها جهود وتيارات الحالتين. [100 KVA, 10 KVA, 91%]

25- محول ذو ملفين مقنناته 60 KVA، 480/240 V ومعاوقة ملفي الجهد العالى والجهد المنخفض Ω (0.016+j0.06) و Ω (0.004+j0.015) على الترتيب ويسحب المحول قدرة 400 W عند اللاحمل. فأذا تم توصيل المحول كمحول ذاتى مقنن جهده 720/480 V، احسب: (1) القدرة المنقولة بالتوصيل والقدرة المنقولة بالتحويل ومقنن قدرة المحول الذاتى؛ (2) نسبة الزيادة فى القدرة ونسبة التوفير فى كمية النحاس مقارنة بالمحول ذو الملفين؛ (3) كفاءة المحولين عند تغذية كل منهما لحمولته الكاملة بمعامل قدرة الوحدة. [120 KVA, 60 KVA, 180 KVA, 300%, 33.33%, 98.55%, 99.5%]

26- محول ثلاثى الاطوار Yy مقنناته 50 KVA، 3300/440 V اعطى النتائج التالية: اختبار اللاحمل 440 V، 504 A، 0.6 KW عند جانب الجهد المنخفض؛ اختبار القصر 160 V، 9 A، 0.8 KW عند جانب الجهد العالي. احسب كفاءة المحول والتيار المسحوب من المصدر عند الحمل الكامل بمعامل قدرة 0.8 متأخر. [96.72%, 9.275 A]

27 - محول ثلاثى الاطوار Yy مقنناته 50 KVA، 2000/500 V اعطى نتائج اختبار القصر التالية: جهد وتيار خط الابتدائى 180 V و 25 A والقدرة الداخلة 1.6 KW. احسب تنظيم جهد المحول عند معامل قدرة: (أ) 0.8 متأخر؛ (ب) 0.8 سابق. [3.9%, -2.2%]

28 - محول ثلاثى الطور Dy مقنناته 1200 KVA، 11000/400 V اعطى نتائج الاختبار التالية: اختبار اللاحمل: 400 V، 36 A، 6.6 KW عند جانب الجهد المنخفض؛ اختبار القصر: 355 V، 63 A، 12.3 KW عند جانب الجهد العالى. احسب ثوابت الدائرة المكافئة التقريبية لكل طور منسوبة الى الابتدائى ثم ارسم هذه الدائرة. واذا

كان المحول يغذى حمولة كاملة بمعامل قدرة 0.8 متأخر، احسب التيار المسحوب من المصدر. [(3.099+j9.255) Ω, (55//j15.09) KΩ, 64 A]

-29 محول ثلاثى الاطوار Yd مقنن جهده 11000/415 V ، يسحب عند فتح الثانوى وتطبيق الجهد المقنن على الجانب الابتدائى قدرة كلية مقدارها 5 KW، واعطى نتائج اختبار القصر التالية: 8 KW، 26.3 A، 650 V عند الجانب الابتدائى. احسب: (1) تيار الحمولة التى تحدث عندها الكفاءة القصوى للمحول؛ (2) تنظيم الجهد وجهد الملف الثانوى عند الحمولة السابقة بمعامل قدرة 0.8 متأخر. [551.1 A, 3.71%, 399.6 V]

-30 محولان احاديان الطور A و B نسبة تحويلهما (نسبة عدد لفاتهما) متساويتان، ومقنن قدراتهما 10 KVA و 15 KVA على الترتيب، ومعاوقاتهما المكافئة منسوبة للابتدائى Ω (0.28+j0.35) و Ω (0.42+j0.60) على الترتيب. فاذا وصل المحولان على التوازى لتغذية حمولة 25 KVA معامل قدرتها الواحد الصحيح، احسب حمولة ومعامل قدرة كل محول. [0.9994 lag., 9.49 KVA, 0.9997 lag., 15.51 KVA]

-31 محولان احاديان الطور A و B مقنن جهدهما 6600/440 V، ومقنن قدراتهما 250 KVA و 600 KVA على الترتيب، وجد عند اجراء اختبار القصر عليهما ان المحول A يحتاج الى تطبيق 5% من مقنن جهده لامرار التيار المقنن بمعامل قدرة 0.23 متأخر، بينما يحتاج المحول B الى تطبيق 4% من مقنن جهده لامرار التيار المقنن بمعامل قدرة 0.16. احسب حمولة ومعامل قدرة كل محول عند تشغيلهما على التوازى لتغذية حمولة 680 KW معامل قدرتها 0.8 متأخر. [177 KW, 0.8 lag. 503 KW, 0.78 lag.]

32- محولان احاديان الطور A و B معاوقاتهما المكافئة منسوبة للثانوي Ω (0.025+j0.06) و Ω (0.01+j0.024) على الترتيب. فأذا كان جهد المحولين عند اللاحمل V 245 و V 240 على الترتيب وتم تشغيلهما على التوازي لتغذية حمولة معاوقتها Ω (0.25+j0.1)، احسب جهد وتيار الحمولة وتيار كل محول. [230.0 V, 854.4 A, 286.8 A, 571.2 A]

33- محولين ثلاثين الطور A Yy و B تم تشغيلهما على التوازى لتغذية حمولة A 500 بمعامل قدرة 0.8 متأخر. فاذا كانت معاوقاتهما المكافئة منسوبة للابتدائى Ω (0.02+j0.2) و Ω (0.03+j0.30) على الترتيب، احسب مقدار ومعامل قدرة التيار الذى يغذيه كل محول. علل التساوى او الاختلاف فى معامل قدرة المحولين. [300 A, 0.8 lag. 200 A, 0.8 lag.]

الفصل الثالث

التحويل الكهروميكانيكي للطاقة

التحويل الكهروميكانيكي للطاقة

1.3 مقدمة.

أهم ما يميز الطاقة الكهربائية مقارنة بالطاقات الأخرى المعروفة للانسان سهولة نقلها لمسافات طويلة و تناولها بكميات كبيرة وبالرغم من ذلك فهي نادراً ما تستخدم مباشرة و انما يتم تحويلها الى صور اخرى اكثر ملائمة و استخداما فى الحياة العملية حيث يتم تحويلها الى طاقة حرارية فى بعض الاستخدامات المنزلية و الصناعية مثل المصابيح والمد افئ و الغلايات والأفران. وفى المقابل تتطلب الكثير من الأجهزة و المعدات تزويدها بالطاقة الميكانيكية كما فى اجهزة التحكم و المراوح و المضخات. و يستلزم كل ذلك ضرورة تحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية والعكس حيث تسمى عملية تحويل الطاقة فى هذه الحالة بالتحويل الكهروميكانيكي للطاقة (electromechanical energy conversion).

وتتفق المبادئ الأساسية لعمل اجهزة ومعدات تحويل الطاقة بين صورها الكهربائية والميكانيكية فى كون عملية تحويل الطاقة تتم بواسطة أو من خلال المجال الكهربائي (الكهروستاتيكي) أو المجال المغناطيسي (الكهرومغناطيسي). وتستخدم غالبية اجهزة ومعدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة المجال المغناطيسي ليمثل وسط الاقتران بين الطاقة الكهربائية والميكانيكية ولا يستخدم المجال الكهربائي الا فى بعض الأجهزة السعوية محدودة الاستخدام. وسيتم التركيز على دراسة انظمة التحويل الكهروميكانيكي ذات المجال المغناطيسي مع امكانية دراسة وتحليل اداء انظمة التحويل ذات المجال الكهربائي باسلوب مماثل.

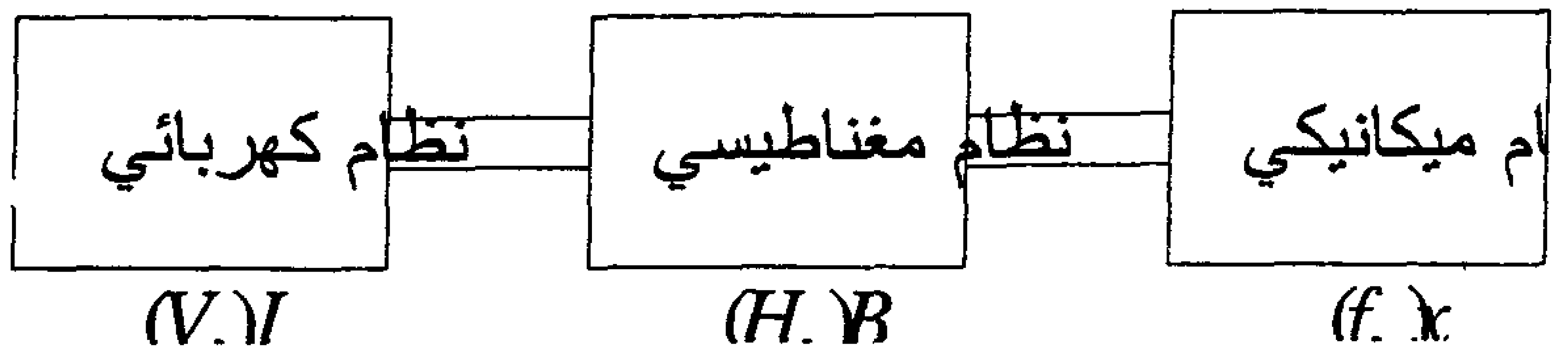
وتصنف اجهزة ومعدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة وفقا لطبيعة وظائفها واستخداماتها التى تحدد شكلها وبنيتها الأساسية. ويضم الصنف الأول محولات الطاقة محدودة الحركة ذات الإشارة الصغيرة

والمستخدمة في أنظمة القياس والتحكم والتى عادة ما تسمى بناقلات الطاقة (transducers) وتشمل اجهزة القياس ولاقطات ومكبرات الصوت واجهزة تسجيل واعادة الصوت. ويضم الصنف الثاني الأجهزة المستخدمة لإنتاج القوى وتشمل الملفات والمغناطيسات الكهربائية والمرحلات وقد يشار اليها بشكل عام بالنبائط الكهرومغناطيسية (electromagnetic devices). ويشمل الصنف الثالث معدات التحويل الكهروميكانيكي المتوصل للطاقة مثل المحركات والمولدات والتى تعرف بالآلات الكهربائية (electrical machines).

ويمكن تمثيل اجهزة ومعدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة التى تستخدم المجال المغناطيسي بمنظومة تتكون اساساً من نظام كهربائي يمثل الجهد والتيار معاملاته الأساسية، ونظام ميكانيكي تمثل القوة والمسافة (العزم والازاحة الزاوية في النظم الدوارة) معاملاته الأساسية، ونظام (مجال) مغناطيسي يمثل الاجهاد وكثافة الفيض المغناطيسي معاملاته الأساسية وكما في الشكل (1). وتعود عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة أساساً الى اثنتين من الظواهر الكهرومغناطيسية وهما:

1 - ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي (electromagnetic induction) التى تؤدي الى احتثات ق.د.ك في موصل عند تحركه في مجال مغناطيسي حيث تحدد قاعدة اليد اليمنى لفليمنج اتجاه ق.د.ك المحتثة في موصل يقطع عمودياً مجال مغناطيسي.

2 - ظاهرة القوى الكهرومغناطيسية (electromagnetic force) التى يتعرض لها الموصل الحامل للتيار نتيجة لوجوده في مجال مغناطيسي حيث تحدد قاعدة اليد اليسرى اتجاه القوة المؤثرة على الموصل العمودي على المجال المغناطيسي.



الشكل (1) تمثيل منظومة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة.

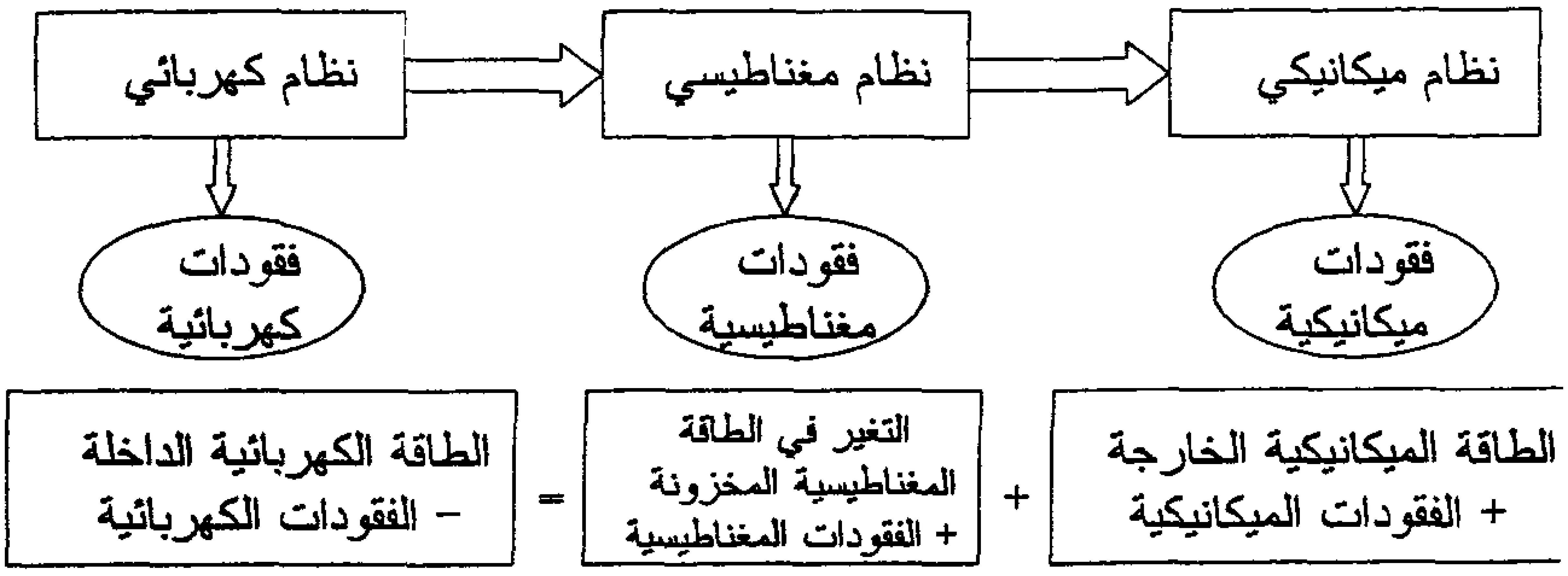
2.3 توازن الطاقة.

من الطرق المستخدمة لدراسة انظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة طريقة توازن الطاقة التى تقوم على مبدأ حفظ الطاقة والذي ينص على ان الطاقة لاتخلق ولاتفنى ولكنها تتحول فى صورها. وفي الأنظمة المعزولة المحددة تسمح هذا الطريقة بتتبع مسار الطاقة عبر النظام على اساس ان التدفق الصافي للطاقة عبر حدود النظام يساوى معدل تغير الطاقة المخزونة فى النظام. وبالرغم من ان هذه الصياغة تمثل القانون الأول للديناميكا الحرارية فهي تنطبق على انظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة التى تستخدم المجال المغناطيسي فى تخزين الطاقة حيث يتطلب تطبيقها الفصل بين آليات الفقد وآلية تخزين الطاقة فى النظام. ويمكن فصل الفقودات المختلفة بتمثيلها بعناصر خارجية ليكون معدل تغير الطاقة المخزونة فى المجال المغناطيسي W_f للنظام غير الفاقد مساوياً للفارق بين القدرة الكهربائية الداخلة P_e والقدرة الميكانيكية الخارجة P_m كما يلي:

$$dW_f/dt = P_e - P_m \qquad (3.1)$$

وتضم مفقودات نظم التحويل الكهروميكانيكي للطاقة، التى تحول الى طاقة حرارية، الفقودات الكهربائية ويمثلها الفقد الاومي فى مقاومة الملفات الكهربائية نتيجة لتدفق التيار، والفقودات المغناطيسية وتمثلها فقودات التخلف المغناطيسي والتيار الدوامي في اللب نتيجة لتغير المجال المغنطيسي والفقودات الميكانيكية ويمثلها فقودات الاحتكاك واضطراب الهواء الناتجين عن الحركة. ويمكن التعبير عن تدفق الطاقة عبر

النظام الفاقد باستخدام طريقة توازن الطاقة كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2) توازن الطاقة فى منظومة تحويل كهروميكانيكي للطاقة.

ويمكن التعبير عن توازن الطاقة المبين في الشكل (2) بدراسة تدفق الطاقة عبر نظام التحويل لفترة زمنية صغيرة dt تم خلالها زيادة صافي الطاقة الكهربائية الداخلة للنظام بمقدار dW_e مما أنتج تغير قدره dW_f فى صافي الطاقة المخزونة في المجال ورفع اجمالي الطاقة الميكانيكية الخارجة بمقدار dW_m مما ادى الى بذل قوة f_m تسببت فى إزاحة الجزء المتحرك مسافة dx. ويمكن تمثيل هذه الصورة الفيزيائية لتوازن الطاقة رياضياً بضرب طرفي المعادلة (3.1) في dt واعادة ترتيبها كما يلي:

$$dW_e = dW_m + dW_f \qquad (3.2)$$

$$P_e\, dt = P_m\, dt + dW_f \qquad (3.3)$$

$$dW_e = P_e\, dt = e\, i\, dt \qquad (3.4)$$

$$dW_m = P_m\, dt = (f_m\, v)\, dt = f_m\, dx \qquad (3.5)$$

وتمثل e فى المعادلة (3.4) ق.د.ك المحتثة فى الطرف الكهربائي (لتغير الطاقة المخزونة فى المجال) والتي من خلالها يزود النظام الكهربائي الطاقة الى المجال المغناطيسي ليتولى تحويلها الى النظام الميكانيكي. وعادة ما يتم تمثيل الفقد الكهربائي وفقد اللب المغناطيسي بمقاومات الطرف الكهربائي وان كان فقد اللب غالباً ما يهمل لصغره. وتشمل الطاقة

الميكانيكية الخارجة الفقودات الميكانيكية التى يمكن اعتبارها جزء من الحمولة ويمثل جزء من القوة الميكانيكية اللازمة للتغلب عليها اذا لم تهمل. وبذلك يمكن التعامل مع فقودات النظام بشكل مستقل بحيث لا تتدخل في عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة ولاتؤثر فيها.

ومن الجدير بالملاحظة ان صافي الطاقات الكهربائية والميكانيكية فى الشكل (2) والمعادلة (3.2) قد اخذت قيم موجبة لتعكس حالة تحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية فى عملية التحريك (motor action). ويمكن تطبيق نفس التمثيل في حالة تحويل الطاقة الميكانيكية الى طاقة كهربائية في عملية التوليد (generator action) بقلب اشارات تلك الطاقات.

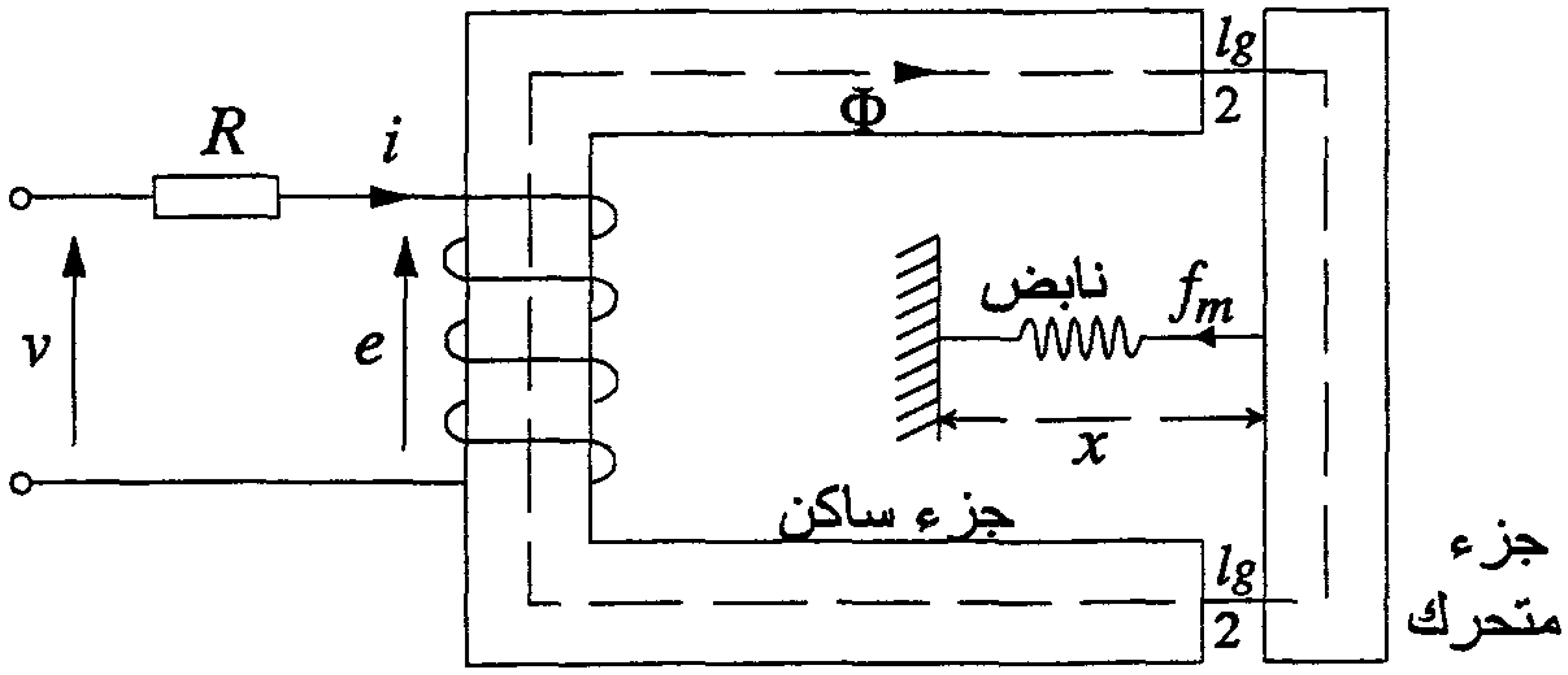
3.3 طاقة المجال المغناطيسي.

يبين الشكل (3) مخطط جهاز بسيط للتحويل الكهروميكانيكي للطاقة حيث تم تمثيل الفقد الكهربائي فى الملف باضافة المقاومة الخارجية R، كما تم اهمال الفقد المغناطيسي مع امكانية اخذه فى الاعتبار باضافة مقاومة موازية عند الاطراف الكهربائية. وكذلك تم اهمال الفقودات الميكانيكية مع امكانية تمثيلها بعناصر خارجية تلحق بالطرف الميكانيكى او اعتبارها جزء من الحمل.

وعند اهمال كتلة الجزء المتحرك وما تختزنه من طاقة ميكانيكية حركية (او معاملتها مثل الفقودات الميكانيكية)، يكون المجال المغناطيسى الوسط الوحيد الخازن للطاقة فى نظام التحويل الكهروميكانيكي للطاقة ذو الحركة الخطية غير الفاقد.

ويمكن دراسة اداء نظام تحويل الطاقة السابق بتثبيت الجزء المتحرك ومنعه من الحركة عند تغرة هوائية محددة وازاحة خطية محددة ورفع التيار من صفر الى i. وعند السكون تكون ازاحة الجزء المتحرك dx

صفراً وكذلك التغير في الطاقة الميكانيكية. وطبقاً لطريقة توازن الطاقة يتضح فى هذه الحالة ان الزيادة في الطاقة الكهربائية الداخلة ستتحول بالكامل الى زيادة في الطاقة المخزونة فى المجال المغناطيسي للجهاز. وبذلك يمكن من المعادلة (3.5) وقانون فاراداي للحث الكهرومغناطيسي التعبير عن الزيادة في الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي كما يلي:



الشكل (3) محول كهر وميكانيكى للطاقة.

$$dW_m = f_m\, dx = 0 \qquad (3.6)$$

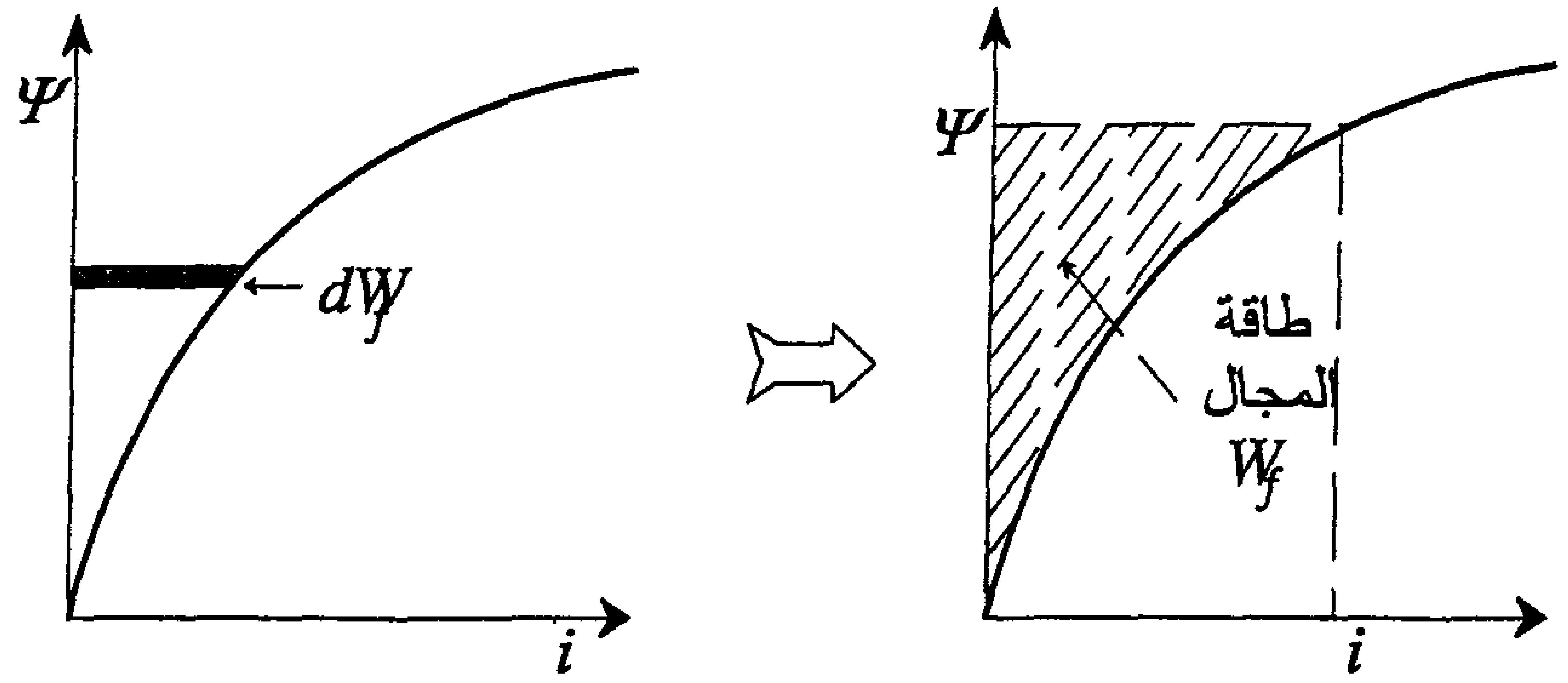
$$e = N\, d\Phi/dt = d\Psi/dt \qquad (3.7)$$

$$dW_e = P_e\, dt = i\, d\Psi \qquad (3.8)$$

$$dW_f = dW_e = i\, d\Psi \qquad (3.9)$$

ومن الجدير بالذكر ان الفيض المغناطيسي Φ ومن تم تشابك الفيض Ψ يتناسبان طردياً مع القوة الدافعة المغناطيسية $F=Ni$ الناتجة عن تدفق التيار i فى ملف ذو N لفة. ويمثل عامل التناسب بين تشابك الفيض والتيار المحاثة L التى تتوقف على ممانعة اللب المغناطيسي ومن تم على أبعاده الهندسية التى يحددها في هذه الحالة طول الثغرة الهوائية او الإزاحة، أى ان $\Psi=L(x).i$. ويبين الشكل (4) منحنى العلاقة بين تشابك الفيض Ψ وتيار الملف i لثغرة هوائية (وازاحة خطية) ذات طول محدد وثابت حيث يبين الشريط المضلل الغامق التغير في طاقة المجال dW_f وعند تزايد تشابك الفيض

من صفر الى Ψ يمكن الحصول على الطاقة الكلية المخزونة في المجال المغناطيسي بتكامل طرفي المعادلة (3.9) كما يلي:



الشكل (4) علاقة Ψ-i لنظام تحويل كهروميكانيكي للطاقة.

$$W_f = \int_0^{\Psi} i \, d\Psi \qquad (3.10)$$

وتمثل المعادلة (3.10) المساحة بين منحنى العلاقة بين تشابك الفيض والتيار ومنحنى تشابك الفيض كما هو مبين في الشكل (4). واذا كان متوسط طول مسار فيض خلال اللب l_C والاجهاد المغناطيسي عليه H_C وكان مجموع اطوال الثغرات الهوائية التى يعبرها الفيض l_g والاجهاد المغناطيسي عليها H_g ومساحة مقطع كل من اللب والثغرات الهوائية A وكثافة الفيض خلال اللب والثغرات B يمكن عند اهمال تسرب الفيض وتهذب الفيض التعبير من اساسيات الكهرومغناطيسية عن تيار الاثارة وتشابك الفيض بدلالة الاجهاد المغناطيسي وكثافة الفيض كما يلي:

$$F = N\,i = l_C H_C + l_g H_g \qquad (3.11)$$

$$i = (l_C H_C + l_g H_g) / N \qquad (3.12)$$

$$d\Psi = N\,d\Phi = N\,A\,dB \qquad (3.13)$$

وبالتعويض فى المعادلة (3.10) عن كل من تيار الاثارة من المعادلة (3.12) وتشابك الفيض من المعادلة (3.13) يمكن الحصول على الطاقة الكلية المخزونة فى المجال المغناطيسي للنظام كما يلي:

$$i\,d\Psi = (l_c H_c + l_g H_g)\,A\,dB \qquad (3.14)$$

$$\begin{aligned} W_f &= \int (l_c H_c + l_g H_g)\,A\,dB \\ &= A.l_c \int H_c\,dB + A.l_g \int H_g\,dB \qquad (3.15) \end{aligned}$$

$$W_f = W_{fc} + W_{fg} \qquad (3.16)$$

حيث تمثل W_{fc} الطاقة المخزونة في مادة اللب وتمثل W_{fg} الطاقة المخزونة فى الثغرات الهوائية. وفي الحياة العملية عادة ما يعبر عن هذه الطاقات بدلالة كثافة الطاقة المخزونة في الأوساط المختلفة وحجمها. فاذا كانت كثافة الطاقة في مادة اللب w_{fc} وحجمه الكلي V_c، وكانت كثافة الطاقة في جميع الثغرات الهوائية w_{fg} وحجمها الكلي V_g يمكن التعبير عن الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي للوسطين كما يلي:

$$W_{fc} = w_{fc}\,.V_c \qquad (3.17)$$

$$w_{fc} = \int H_c\,dB\,, \quad V_c = A.l_c$$

$$W_{fg} = w_{fg}\,.V_g \qquad (3.18)$$

$$w_{fg} = \int H_g\,dB\,, \quad V_g = A.l_g$$

وفي الحياة العملية عادة ما تكون الطاقة المخزونة في مجال الثغرات الهوائية لأنظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة أكبر بكثير من الطاقة المخزونة في مادة اللب المغناطيسي وهو ما يسمح في بعض الحالات باهمال الطاقة المخزونة في مجال مادة اللب. وحتى عند عدم اهمال الطاقة المخزونة في مجال مادة اللب يمكن في اغلب الحالات اهمال اللاخطية في العلاقة بين هذه الطاقة وكثافة الفيض والناتجة عن لاخطية علاقة B-H للب الحديدي.

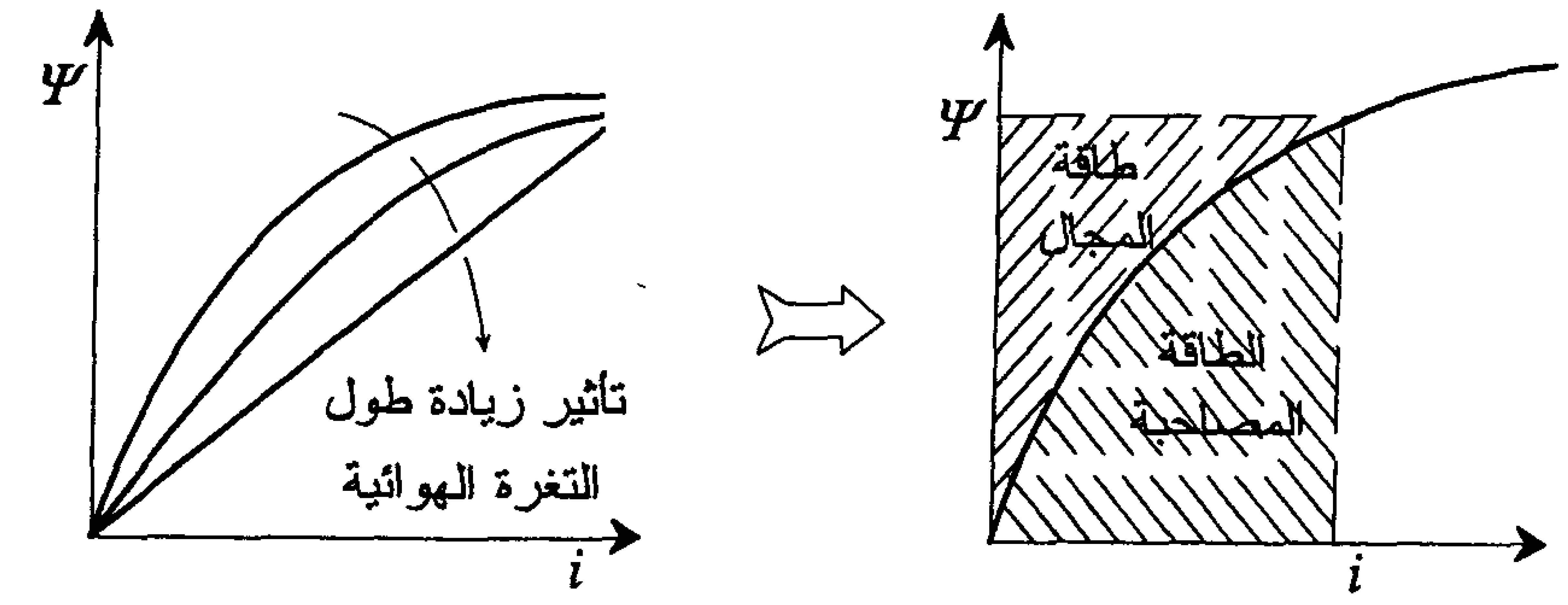
وحيث ان نفاذية الثغرات الهوائية ثابتة وتساوي تقريبياً نفاذية الفراغ μ_o، يمكن في الأنظمة المغناطيسية الخطية التي يميزها ثبوت النفاذية المغناطيسية لمادة اللب μ_c التعبير عن الطاقة W_{fg} المخزونة في التغرات الهوائية والطاقة W_{fc} المخزونة في مادة اللب المغناطيسي كما يلي (لاحظ ان $B = \mu H$):

$$W_{fg} = V_g \int (B/\mu_o)\, dB = ½\, (B^2/\mu_o)\, V_g \qquad (3.19)$$

$$W_{fc} = V_c \int (B/\mu_c)\, dB = ½\, (B^2/\mu_c)\, V_c \qquad (3.20)$$

1.3.3- الطاقة المصاحبة.

تبين فيما سبق ان العلاقة بين تشابك الفيض وتيار ملفات الاثارة لانظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة ومن تم الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي لهذه الأنظمة تعتمد على طول الثغرة الهوائية وخاصية العلاقة بين كثافة الفيض والاجهاد المغناطيسي للمادة المغناطيسية المصنوع منها اللب حيث يبين الشكل (5) منحنيات علاقة Ψ-i لاطوال مختلفة للثغرة الهوائية. ومن الواضح ان هذه العلاقة غير الخطية سوف تقترب كثيراً من العلاقة الخطية عند القيم الكبيرة نسبياً لطول الثغرة الهوائية، بينما تزداد لاخطية علاقة Ψ-i مع تناقص طول الثغرة الهوائية وكما هو مبين في الشكل (5).



الشكل (5) علاقة Ψ-i لاطوال مختلفة للثغرة الهوائية والطاقة المصاحبة.

وقد تم في المعادلتين (3.10) و (3.15) التعبير عن الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي للنظام بدلالة تشابك وكثافة الفيض المغناطيسي على الترتيب. وفي بعض التحليلات والدراسات الخاصة ببعض التطبيقات قد يكون من الأنسب التعبير عن هذه الطاقة والقوى والعزوم الميكانيكية الناتجة عنها بدلالة التيار الكهربائي بدلاً من الكميات المغناطيسية. وبينما يتطلب الوصول الى تلك العلاقة اشتقاق صيغة مناسبة للتعبير في المعادلة (3.10) عن تشابك الفيض المغناطيسي بدلالة تيار الملف المنشئ للفيض، يمكن من الشكل (5) مباشرة وببساطة التعبير عن هذه العلاقة بدلالة المساحة بين منحنى علاقة Ψ-i ومحور التيار والتي تعرف بالطاقة المصاحبة $W'f$ (coenergy) حيث نحصل من الشكل (5) على العلاقات التالية:

$$W'f = \int_0^i \Psi \, di \qquad (3.21)$$

$$Wf + W'f = \Psi I \qquad (3.22)$$

ويمكن من الشكل (5) ملاحظة ان الطاقة المخزونة والطاقة المصاحبة متساويتان ($Wf = W'f$) في الأنظمة التى تكون علاقة Ψ-i لها خطية، بينما تكون الطاقة المخزونة اصغر من الطاقة المصاحبة ($Wf < W'f$) في الأنظمة التى تتميز بكون علاقة Ψ-i لاخطية لها. ومن الجدير بالذكر انه بالامكان اشتقاق صيغ متشابهة للمعادلة (3.15) للتعبير عن الطاقة المصاحبة كما يلي:

$$di = (l_c \, dH_c + l_g \, dH_g) / N \qquad (3.23)$$

$$dW'f = \Psi di = (A.l_c B_c \, dH_c + A.l_g B_g \, dH_g) \qquad (3.24)$$

$$W'f = \int (A.l_c B_c \, dH_c + A.l_g B_g \, dH_g) \qquad (3.25)$$

$$= A.l_c \int B_c \, dH_c + A.l_g \int B_g \, dH_g \qquad (3.26)$$

$$= V_c . w'fc + V_g . w'fg = W'fc + W'fg. \qquad (3.27)$$

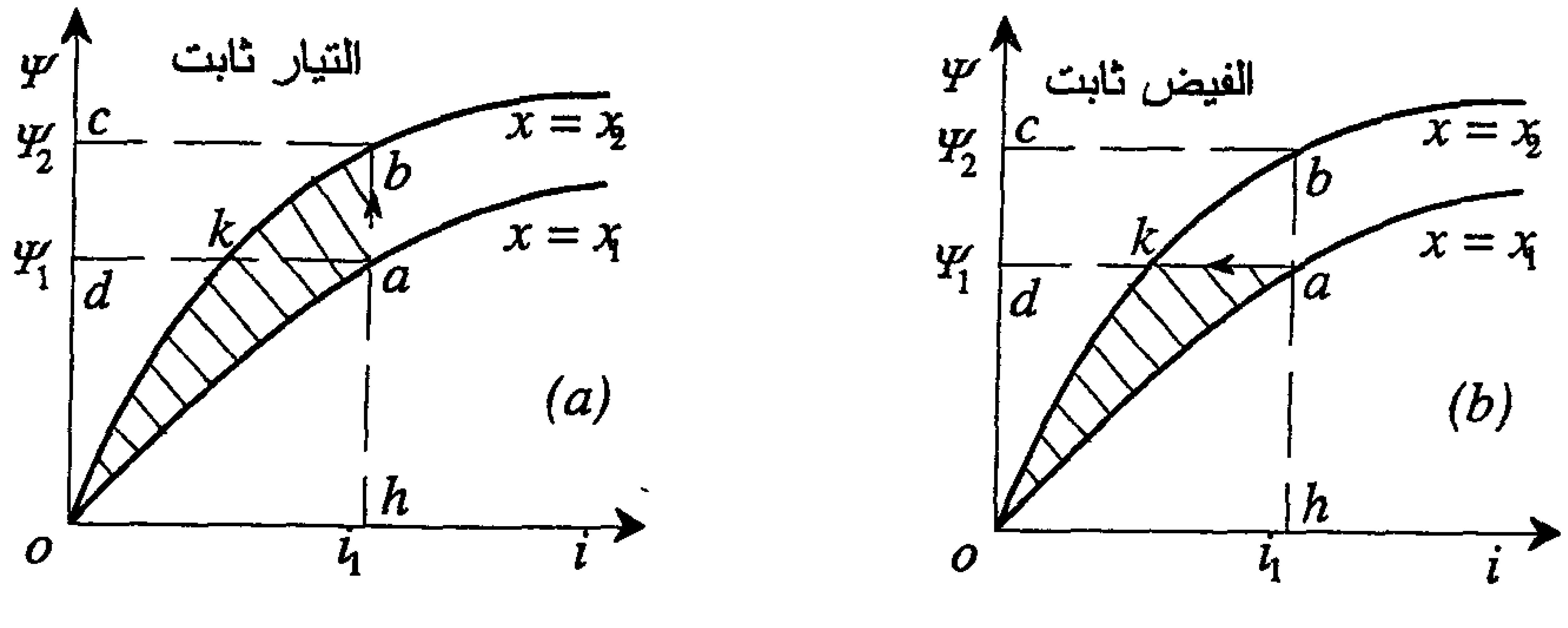
$$W'_{fg} = V_g \int (\mu_o H_g)\, dH_g = ½\, (\mu_o H_g^2)\, V_g \qquad (3.28)$$

$$W'_{fc} = V_c \int (\mu_c H_c)\, dH_c = ½\, (\mu_c H_c^2)\, V_c \qquad (3.29)$$

وبذلك يتبين بمقارنة المعادلتين (3.19) و (3.28) والمعادلتين (3.20) و (3.29) تساوي طاقة المجال والطاقة المصاحبة في حالة افتراض خطية الخصائص المغناطيسية لأداة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة.

4.3 القوى الميكانيكية في انظمة التحويل احادية المصدر.

تعطى المعادلتين (3.15) و (3.25) الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي والطاقة المصاحبة لنظام احادي مصدر الإثارة غير فاقد للتحويل الكهروميكانيكي للطاقة ذو حركة خطية وخصائص مغناطيسية خطية مثل محول الطاقة المبين في الشكل (3). ويمكن دراسة اداء هذه النظم بالتعبير عن القوة الميكانيكية المبذولة والتغير في طاقة المجال عند نقصان طول الثغرة الهوائية نتيجة لتغير الازاحة من $x1$ الى $x2$ ويبين الشكل (6) منحنيات Ψ-i عند الموضعين $x1$ الى $x2$ فى حالتي ثبوت التيار وثبوت تشابك الفيض حيث تتغير نقطة التشغيل من النقطة a عندما $x=x1$ الى النقطة b عندما $x=x2$.



الشكل (6) الطاقة الميكانيكية الخارجة اثناء عملية تحويل الطاقة.

فاذا تحرك الجزء المتحرك ببطىء بين الموضعين سيؤدي نقصان الثغرة الهوائية الى زيادة الفيض وتشابكه ومن ثم بذل شغل ميكانيكي على الجزء المتحرك. ولكون الحركة بطيئة سيكون التغير في ممانعة الثغرة الهوائية والفيض بطيء ومن ثم التغير في ق.د.ك المحثة مهمل. وبذلك يبقى تيار الإثارة ثابتاً عند i_1 في الفترة العابرة اثناء الحركة مما يصعد بنقطة التشغيل رأسياً من النقطة a عند x_1 الى b عند x_2 كما في الشكل (6a). ويمكن في هذه الحالة التعبير عن التغير في الطاقة الكهربائية dW_e وطاقة المجال dW_f والطاقة المصاحبة dW'_f والطاقة الميكانيكية dW_m نتيجة لحركة الجزء المتحرك كما يلي:

$$\Delta W_e = W_{e2} - W_{e1} = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i\, d\Psi = (\Psi_2 - \Psi_1)\, i_1 = A_{abcd} \qquad (3.30)$$

$$\Delta W_f = W_{f2} - W_{f1} = \int_{x_2} i\, d\Psi - \int_{x_1} i.d\Psi = A_{obc} - A_{od} \qquad (3.31)$$

$$\Delta W'_f = W'_{f2} - W'_{f1} = \int_{x_2} \Psi\, di - \int_{x_1} \Psi\, di = A_{ohb} - A_{oha} = A_{oab} \qquad (3.32)$$

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_f = A_{abcd} - (A_{obc} - A_{oad}) = (A_{abcd} + A_{oad}) - A_{obc} = A_{oab} \qquad (3.33)$$

ويتضح من المعادلتين (3.32) و(3.33) ان التغير في الطاقة الميكانيكية أو الشغل الميكانيكي عند ثبوت التيار يساوي الزيادة في الطاقة المصاحبة. وعلية يمكن من المعادلة (3.2) التعبير عن القوة الميكانيكية f_m المؤثرة على الجزء المتحرك كما يلي:

$$dW_m = dW'_f = f_m\, dx \qquad (3.34)$$

$$f_m = (\partial / \partial x)\, W'_f(i,x)\big|_{const.\ i} \qquad (3.35)$$

وعند الحركة بسرعة عالية مع ثبوت تيار الإثارة عند i_1 كما سبق، لن يتوفر الوقت الكافئ للفيض للتغير اثناء الحركة مما يعني ثبوت

تشابك الفيض عند Ψ_1 اثناء الحركة وانتقال نقطة التشغيل افقيا" من a الى k. ولكن عند ثبوث التيار سيجعل تشابك الفيض يعود الى النقطة b في النهاية وكما هو مبين في الشكل (6b) وبذلك تتبع نقطة التشغيل في الحالة العابرة المسار akb. وبسبب ثبوت تشابك الفيض $(d\Psi=0)$ تكون ق.د.ك المحتثة ومن تم التغير في الطاقة الكهربائية dW_e صفراً ويمكن في هذه الحالة التعبير عن التغير في الطاقة الكهربائية dW_e وطاقة المجال dW_f والطاقة الميكانيكية dW_m كما يلي:

$$\Delta W_f = W_{f2} - W_{f1} = A_{okd} - A_{oad} = -A_{oak} \quad (3.36)$$

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_f = 0 - \Delta W_f = +A_{oak} \quad (3.37)$$

ويتضح من المعادلتين (3.36) و (3.37) ان التغير في الطاقة الميكانيكية عند ثبوت تشابك الفيض تسحب من الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي لتساوي التناقص في الطاقة المخزونة. وعليه يمكن التعبير عن القوة الميكانيكية f_m المؤثرة كما يلي:

$$dW_m = -dW_f = f_m\, dx \quad (3.38)$$

$$f_m = (\partial/\partial x)\, W_f(\psi,x)\big|_{const.\,\psi} \quad (3.39)$$

وفي انظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة العملية تكون سرعة الجزء المتحرك متوسطة مما يؤدي الى تغير التيار وتشابك الفيض ليكون مسار نقطة التشغيل بين a و b وسط بين المسارين المبينين في الشكل (6) ويبقى الشغل الميكانيكي المبذول مساوياً للمساحة المحصورة بين منحنيات Ψ-i قبل وبعد الإزاحة والمسار العابر لنقطة التشغيل. وعند الإزاحة الصغيرة dx تكون المساحات المضللة في الشكل (6) متساوية والقوى الميكانيكية المحسوبة من المعادلتين (3.35) و (3.39) متساوية.

وفي حالة تحرك الجزء المتحرك في الاتجاه المعاكس من b الى a بفعل مؤثر خارجي يمكن بطريقة مماثلة التعبير عن التغير في الطاقة الميكانيكية أو الشغل المبذول بالمساحة المحصورة بين منحنيات علاقات Ψ-i قبل وبعد الإزاحة والمسار العابر لنقطة التشغيل مع قلب اتجاه حركة نقطة التشغيل على المسار العابر المبين في شكل (6).

1.4.3 انظمة التحويل ذات الانظمة المغناطيسية الخطية.

لقد تم التعبيرعن القوة الميكانيكية في محولات الطاقة بدلالة طاقة المجال المغناطيسي في صيغة مساحة محصورة بين منحنيات Ψ-i والتى غالباً ما يصعب الحصول على البيانات المطلوبة لها، وهو ما يجعل هذه الصيغة لا تستخدم كثيراً في الحياة العملية. ونظراً لأن الثغرات الهوائية تختزن معظم طاقة المجال المغناطيسي لأنظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة يمكن اهمال الطاقة المخزونة في اللب دون ان تتأثر النتائج كثيراً. كما ان اهمال تغير ممانعة اللب مع تشابك الفيض يسمح بالتقريب الخطي لعلاقة Ψ-i والحصول على نتائج مقبولة بشكل ابسط. وفي هذه الحالة يصبح النظام المغناطيسي لمحول الطاقة ذو خصائص خطية وتكون علاقة Ψ-i خط مستقبل ويتبين من الشكل (5) ان الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي تساوي الطاقة المصاحبة. وعليه يمكن في هذه الحالة المثالية التعبير عن المحاثة كدالة خطية في الإزاحة فقط ومن ثم نجد من المعادلة (3.22) ان:

$$W_f = W'_f = \tfrac{1}{2}\,\Psi i \qquad (3.40)$$

$$\Psi = i.L(x)\ ,\ W'_f = \tfrac{1}{2}\,\Psi i = \tfrac{1}{2}\,i^2 L(x) \qquad (3.41)$$

$$i = \Psi / L(x)\ ,\qquad W_f = \tfrac{1}{2}\,\Psi i = \tfrac{1}{2}\,\Psi^2 / L(x) \qquad (3.42)$$

وبالتعويض من المعادلتين (3.41) و(3.42) في المعادلتين (3.35) و(3.39) على الترتيب يمكن حساب القوة الميكانيكية المؤثرة في الجزء

المتحرك بدلالة الطاقة المصاحبة أولاً والطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي ثانياً على الترتيب وكما يلي:

$$fm = (\partial/\partial x)\, W'f(i,x)|_{const.\,i}$$

$$= (\partial/\partial x)\, [½\, i^2 L(x)] = ½\, i^2 dL(x)/dx \qquad (3.43)$$

$$fm = -(\partial/\partial x)\, Wf(\Psi,x)|_{const.\,\psi} \qquad (3.44)$$

$$= -(\partial/\partial x)\, [½\,\Psi^2/L(x)] = ½[\Psi/L(x)]^2\, dL(x)/dx = ½\, i^2 dL(x)/dx$$

وتبين المعادلتين (3.43) و (3.44) انه يمكن الوصول لنفس الصيغة للقوة الميكانيكية المنتجة في محولات الطاقة الكهروميكانيكية سواء ان تم التحليل استناداً الى دالة الطاقة المصاحبة أو دالة الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي. وباهمال ممانعة اللب للنظام المغناطيسي الخطي المبين في الشكل (3) تكون الطاقة المخزونة في المجال والطاقة المصاحبة مساويتان للطاقة المخزونة في الثغرة الهوائية المعطاة بالمعادلتين (3.19) و (3.28)، وبملاحظة ان $(\partial/\partial x=\partial/\partial l_g)$ نجد ان :

$$Wf = W'f = ½\,(B^2/\mu_o)\, l_g A_g = ½\,(\mu_o H_g^2)\, l_g A_g \qquad (3.45)$$

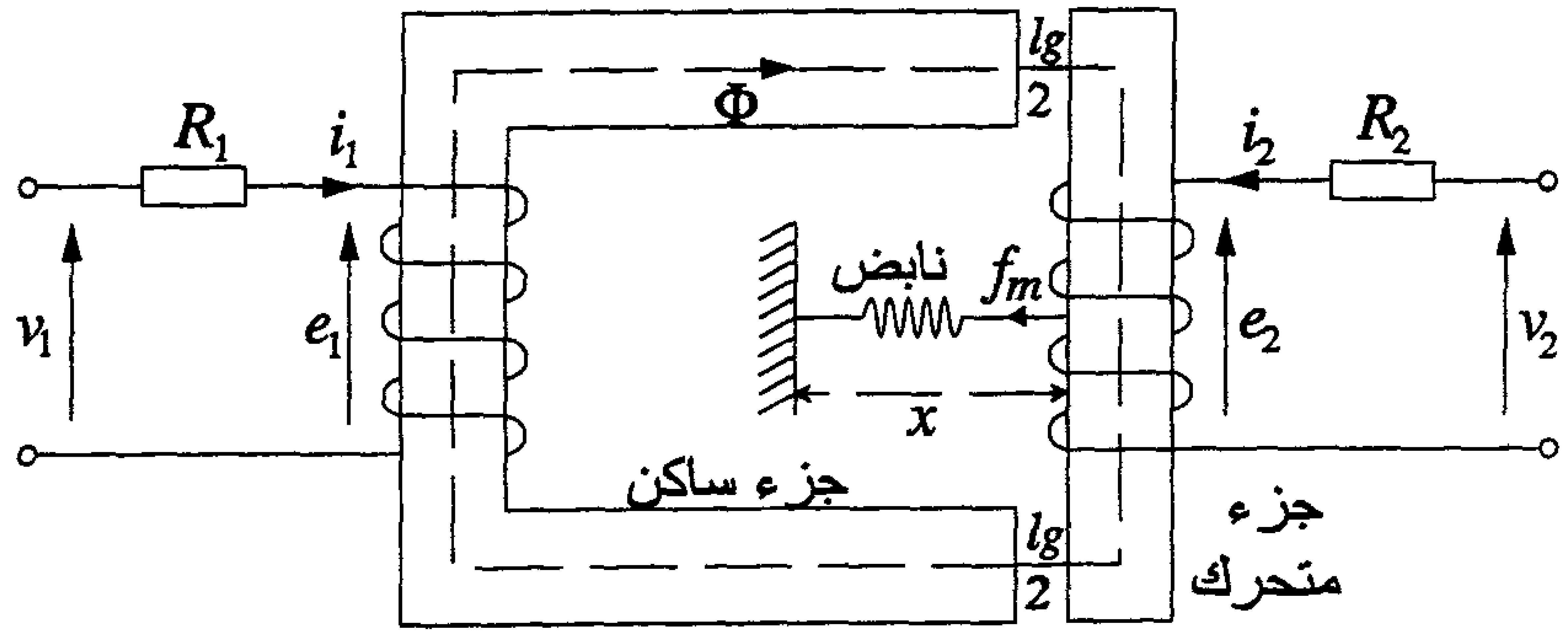
$$fm = -(\partial/\partial l_g)\, [½\,(B^2/\mu_o)\, l_g A_g] = ½\,(B^2/\mu_o)\, A_g = ½\,(\mu_o H_g^2)\, A_g \qquad (3.46)$$

2.4.3 القوى الميكانيكية في الأنظمة متعددة المصادر.

وبقسمة اطراف المعادلة (3.46) على A_g نجد ان القوة الميكانيكية لكل وحده مساحة بين حدود الثغرة الهوائية تساوى كثافة الطاقة المخزونة فى المجال المغنطيسى المحصور بتلك الحدود . وتسمى القوة الميكانيكية لكل وحدة مساحة بين حدود الثغرة الهوائية بالضغط المغناطيسى Fm وتعطى بالمعادلة التالية:

$$F_m = ½ (B^2/\mu_o) = ½ (\mu_o H_g{}^2) \quad , \qquad f_m = F_m A_g \quad (3.47)$$

يضم العديد من اجهزة ومعدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة المستخدمة في اجهزة القياس ومعدات تحويل الطاقة في الحياة العملية اثنتين او اكثر من اللفائف المنفصلة التي تمثل مصادر مستقلة للإثارة ويمكن تمثيلها باطراف كهربائية منفصلة مناسبة. وعادة ما يتم ترتيب اللفائف ليكون واحد او مجموعة منها على الجزء الساكن وواحد أو مجموعة اخرى على الجزء المتحرك. ويمكن تحليل هذه الأنظمة بنفس الأسلوب و التقنيات المستخدمة لتحليل النظم احادية المصدر للتعبير عن الطاقة المخزونة في المجال والطاقة المصاحبة ومن ثم الحصول على المعادلات المناسبة لحساب القوى والعزوم الميكانيكية المبذولة.



الشكل (7) محول طاقة كهروميكانيكي مزدوج المصدر.

ويبين الشكل (7) محول طاقة كهروميكانيكي بسيط مزدوج مصدر الإثارة ذو حركة خطية وخصائص مغناطيسية خطية، حيث المحاثات الذاتية L_1 للملف الأول و L_2 للملف الثاني والمحاثة التبادلية M دالة في الإزاحة الخطية x (طول الثغرة الهوائية). وباهمال الفقودات تكون التغيرات في الطاقة الكهربائية وطاقة المجال متساوية عند السكون حيث تكون الطاقة الميكانيكية صفر. واذا كانت التيارات i_1 للملف الأول و i_2 للثاني يمكن التعبير عن تشابكات الفيض الكلية Ψ_1 للملف الأول وΨ_2 للثاني

والتغير في طاقة المجال المساوية للتغير في الطاقة الكهربائية في هذه الحالة كما يلي:

$$\Psi_1 = i_1 L_1 (x) + i_2 M (x) \ , \ \Psi_2 = i_2 L_2 (x) + i_1 M (x) \qquad (3.48)$$

$$dW_f = dW_e = e_1 i_1 \, dt + e_2 i_2 \, dt = i_1 \, d\Psi_1 + i_2 \, d\Psi_2 \qquad (3.49)$$

وعند السكون وثبوت الثغرة الهوائية تكون المحاثات ثابتة ويمكن التعبير عن التغير في الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي بدلالة المحاثات وتغير التيارات بالتعويض عن تشابكات الفيوض من المعادلة (3.48) في المعادلة (3.49) كما يلي:

$$dW_f = i_1 d[i_1 L_1(x) + i_2 M(x)] + i_2 d[i_2 L_2(x) + i_1 M(x)] \qquad (3.50)$$

$$= i_1 \, L_1 \, d\, i_1 + i_2 \, L_2 \, d\, i_2 + M\,(i_2 \, d\, i_1 + i_1 \, d\, i_2)$$

$$= i_1 \, L_1 \, d\, i_1 + i_2 \, L_2 \, d\, i_2 + M \, d\,(\, i_1 \, i_2) \qquad (3.51)$$

وعند خطية الخصائص المغناطيسية لمحول الطاقة الكهروميكانيكي المبين في الشكل (7) تكون الطاقة المصاحبة مساوية للطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي والتي يمكن الحصول عليها بتكامل طرفي المعادلة (3.51) كما يلي :

$$W'_f = W_f = L_1 \int i_1 \, d\, i_1 + L_2 \int i_2 \, d\, i_2 + M \int d\,(i_1 \, i_2)$$

$$= \tfrac{1}{2} L_1 \, i_1^2 + \tfrac{1}{2} L_2 \, i_2^2 + M\,(i_1 \, i_2) \qquad (3.52)$$

وبذلك يمكن من المعادلة (3.35) حساب القوة الميكانيكية المؤثرة على الجزء المتحرك بالتعويض عن الطاقة المصاحبة من المعادلة (3.52) وبنفس الخطوات المستخدمة لحساب القوة الميكانيكية في حالة الأنظمة احادية مصدر الاثارة كما يلي:

$$f_m = (\partial / \partial x) \, W'_f(i,x)|_{const.\, i}$$

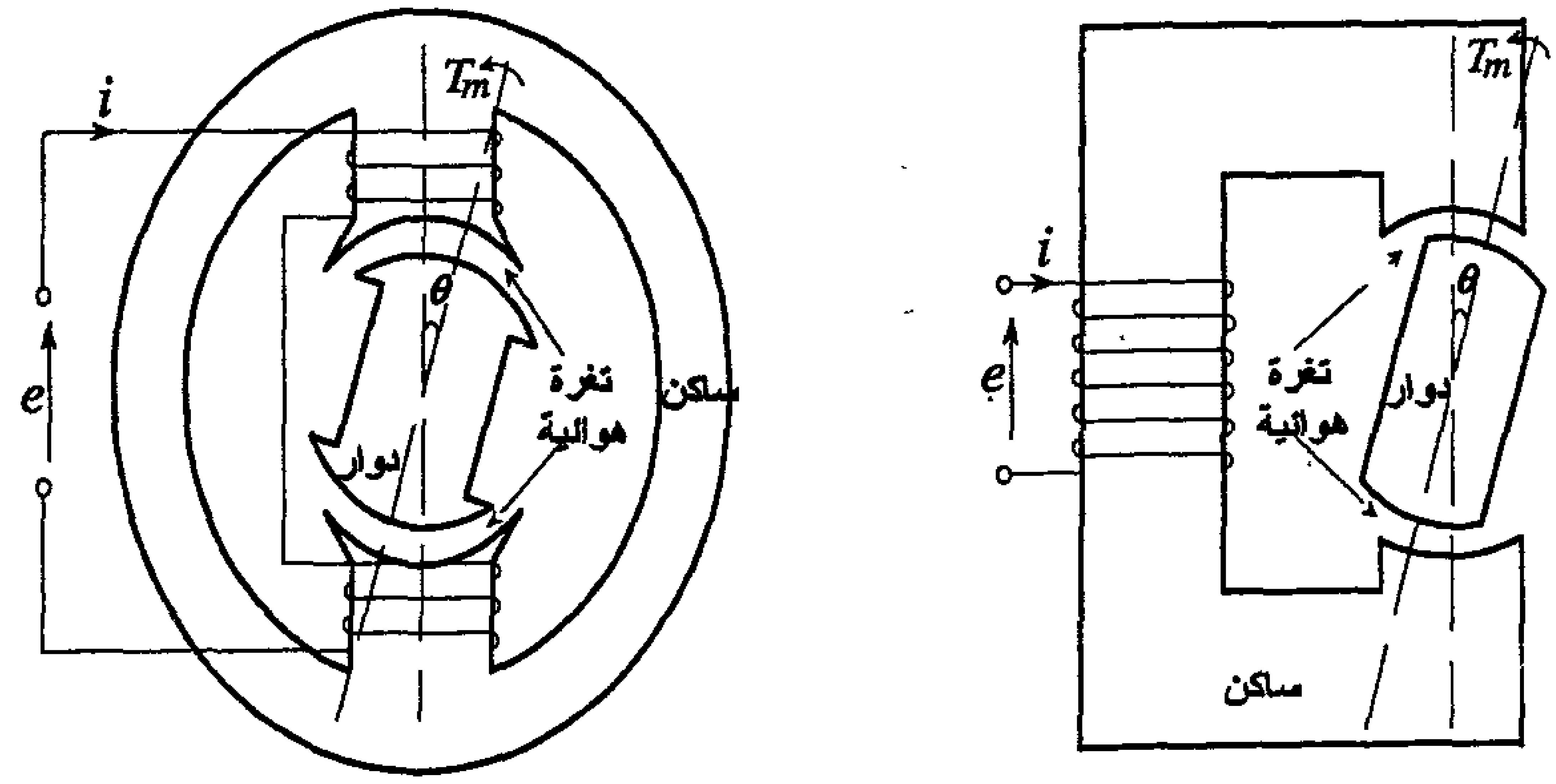
$$= (\partial / \partial x) [½ L_1 i_1^2 + ½ L_2 i_2^2 + M (i_1 i_2)]$$

$$= ½ i_1^2 dL_1(x) / dx + ½ i_2^2 dL_2(x) / dx + i_1 i_2 dM(x) / dx$$

(3.53)

5.3 العزم المبذول فى الانظمة الدوارة.

أن معظم معدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة تنتج حركة دورا نية وتتكون من عضو غير متحرك يسمى بالساكن (stator) وآخر حر الحركة يسمى بالدوار (rotor) يثبت على عمود ادارة ويفصله عن اقطاب الساكن تغرة هوائية ذات ابعاد محددة. ومن اساسيات الميكانيكا يتبين ان العزم T_m والازاحة الزاوية θ في الحركة الد ورانية (حيث $W=T_m\theta$)، يناظران القوة f_m والازاحة x في الحركة الخطية (حيث $W=f_m\,x$). ويبين الشكل (8) محول طاقة كهروميكانيكي دوار احادى مصدر الاثارة حيث r نصف قطر الدوار و l_g مجموع اطوال الثغرات الهوائية التى يعبرها الفيض و l_a الطول المحوري للعضوين.



الشكل (8) محول طاقة كهروميكانيكي دوار.

ويمكن باستخدام طريقة توازن الطاقة الحصول على العزم باعتبار الزيادة الصغيرة في الطاقة الميكانيكية الخارجة dW_m ستنتج عزم T_m وتؤدي الى ازاحة محور الدوار بزاوية صغيرة $d\theta$. وكما تم إثباته مع الحركة

الخطية في الشكل (6) والمعادلة (3.34) فإن الزيادة في الطاقة الميكانيكية الخارجة تساوي التغير في الطاقة المصاحبة $dW'f$ عند ثبوت تيار الاثارة وكما يلي:

$$dW_m = - dW'f = T_m \, d\theta \qquad (3.54)$$

ومن المعادلة (3.54) يمكن بصفة عامة التعبير عن العزم الميكانيكي T_m في النظم الدوارة بدلالة الطاقة المصاحبة بشكل مماثل لما تم مع الانظمة ذات الحركة الخطية في المعادلة (3.35) وكما يلي:

$$T_m = (\partial / \partial \theta) \, W'f(i, \theta)|_{const.i} \qquad (3.55)$$

وبافتراض ان النظام المغناطيسي ذو خصائص خطية تكون الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي مساوية للطاقة المصاحبة. وعليه يمكن من المعادلتين (3.41) و (3.42) التعبير عن طاقة المجال والطاقة المصاحبة المساوية لها لمحول الطاقة الدوار المبين في الشكل (8) ومن تم الحصول من المعادلة (3.55) على معادلة العزم كما يلي:

$$W'f = W_f = ½ \, \Psi i = ½ \, i^2 L(\theta) \qquad (3.56)$$

$$T_m = (\partial / \partial \theta) \, [½ \, i^2 L(\theta)] = ½ \, i^2 dL / d\theta \qquad (3.57)$$

وباهمال ممانعة اللب تكون الطاقة المخزونة في المجال والطاقة المصاحبة مساويتان للطاقة المخزونة في مجال الثغرة الهوائية. وحيث ان مساحة مسار الفيض خلال الثغرات في هذه الحالة يساوى حاصل ضرب طول القوس $r\theta$ في الطول المحوري l_a، يمكن بالتعويض من المعادلة (3.56) في المعادلة (3.55) حساب العزم بدلالة الطاقة المصاحبة وطاقة المجال كما يلي:

$$\Psi = N B_g A_g \; , \qquad i = H_g \, l_g / N$$

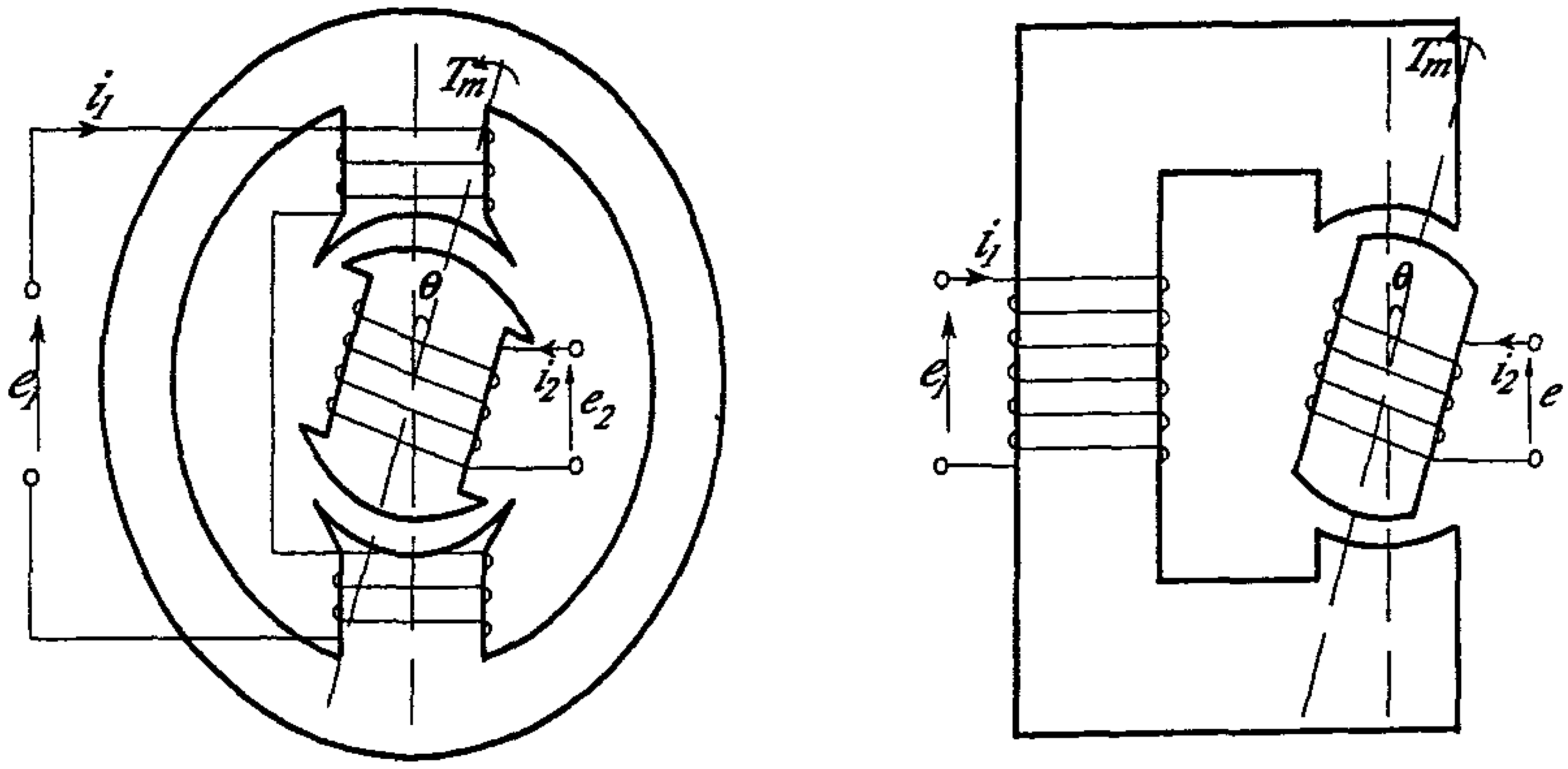
$$W'f = ½ \, H_g B_g \, l_g A_g = ½ \, (B_g^2 / \mu_o) \, l_g A_g \qquad (3.58)$$

$$T_m=(\partial/\partial\theta)[½\,(B_g^2/\mu_o)l_g r\theta l_a] = ½\,(B_g^2/\mu_o)\, l_g\, r\, l_a \quad (3.59)$$

ويجدر بالذكر ان العزم المبذول في محول الطاقة المبين في الشكل (8) يعمل على استقامة الدوار على خط المجال المغناطيسي، فحتى لو تأرجح الدوار نتيجة لعزم قصوره بعيداً سيعيده العزم المبذول للاستقامة مع المجال اذا ظل اتجاه المجال ثابتاً. ويشترط للدوران المتواصل ان يكون الفيض ومن تم تيار الاثارة متردد وكما في محركات الممانعة (reluctance motor).

1.5.3 العزم في الآلات الدوارة متعددة المصادر.

تضم معظم معدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة الدورانية والتى تعرف بالآلات الكهربائية الدوارة مصدر اثارة واحد على الاقل في كل من العضوين الساكن والدور كما في الآلة البدائية المبينة في الشكل (9). ولتغير ابعاد الثغرة الهوائية مع الدوران، فإن ممانعة المسار المغناطيسي ومن تم المحاثات الذاتية L_1 و L_2 للملفين الاول والثاني المحاثة التبادلية M تكون دالة في الازاحة الزاوية θ بين محوري اقطاب الدوار والساكن والتى تتغير بدورها مع الزمن وفقا" للسرعة الزاوية $(\omega=d\theta\ /dt)$. واذا كان تيارات الملفين i_1 و i_2 يمكن التعبير عن تشابكات الفيض Ψ_1 و Ψ_2 وق.د.ك المحثة في كل منهما كما يلي:



الشكل (9) محول طاقة كهروميكانيكي دوار مزدوج المصدر.

$$\Psi_1 = i_1 L_1(\theta) + i_2 M(\theta),\ e_1 = d\Psi_1/dt = (d/dt)[i_1 L_1(\theta) + i_2 M(\theta)] \quad (3.60)$$

$$\Psi_2 = i_2 L_2(\theta) + i_1 M(\theta),\ e_2 = d\Psi_2/dt = (d/dt)[i_2 L_2(\theta) + i_1 M(\theta)] \quad (3.61)$$

$$e_1 = [L_1 d i_1/dt + M d i_2/dt] + \omega[i_1 d L_1/d\theta + i_2 d M/d\theta],\ \omega = d\theta/dt \quad (3.62)$$

$$e_2 = [L_2 d i_2/dt + M d i_1/dt] + \omega[i_2 d L_2/d\theta + i_1 d M/d\theta],\ \omega = d\theta/dt \quad (3.63)$$

وتمثل العناصر المضروبة في السرعة الزاوية ω في المعادلتين (3.62) و (3.63) الجهود الدورانية التي تكون صفراً عند السكون. وبإهمال الفقودات تكون التغيرات في الطاقة الكهربائية وطاقة المجال متساوية عند السكون حيث تكون الطاقة الميكانيكية صفر. وعليه يمكن في حالة السكون حذف عناصر المحاثات الثغرة من المعادلتين (3.62) و (3.63) والحصول منهما على التغير في الطاقة الكهربائية عند السكون dW_e وطاقة المجال المغناطيسي dW_f المساوية لها كما يلي:

$$\begin{aligned} dW_f = dW_e &= (e_1 i_1\, dt + e_2 i_2\, dt) \\ &= i_1 [L_1\, d i_1/dt + M\, d i_2/dt]\, dt + i_2 [L_2\, d i_2/dt + M\, d i_1/dt]\, dt \\ &= i_1 L_1\, d i_1 + i_2 L_2\, d i_2 + M (i_2\, d i_1 + i_1\, d i_2] \\ &= L_1 i_1\, d i_1 + L_2 i_2\, d i_2 + M\, d(i_1 i_2) \quad (3.64) \end{aligned}$$

وباهمال ممانعة اللب تكون الخصائص المغناطيسية للنظام خطية والتغيرات في الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي للثغرة الهوائية والطاقة المصاحبة متساويتان حيث يمكن الحصول عليها بتكامل طرفي المعادلة (3.64) كما يلي :

$$W'_f = W_f = L_1 \int i_1\, d i_1 + L_2 \int i_2\, d i_2 + M \int d\,(i_1 i_2)$$

$$= \tfrac{1}{2} L_1 i_1^2 + \tfrac{1}{2} L_2 i_2^2 + M\,(i_1 i_2) \qquad (3.65)$$

وبذلك يمكن من المعادلة (3.55) حساب العزم المبذول على الدوار بالتعويض عن الطاقة المصاحبة من المعادلة (3.65) كما يلي:

$$T_m = (\partial / \partial \theta)\, W'_f (i, \theta)|_{const.i}$$

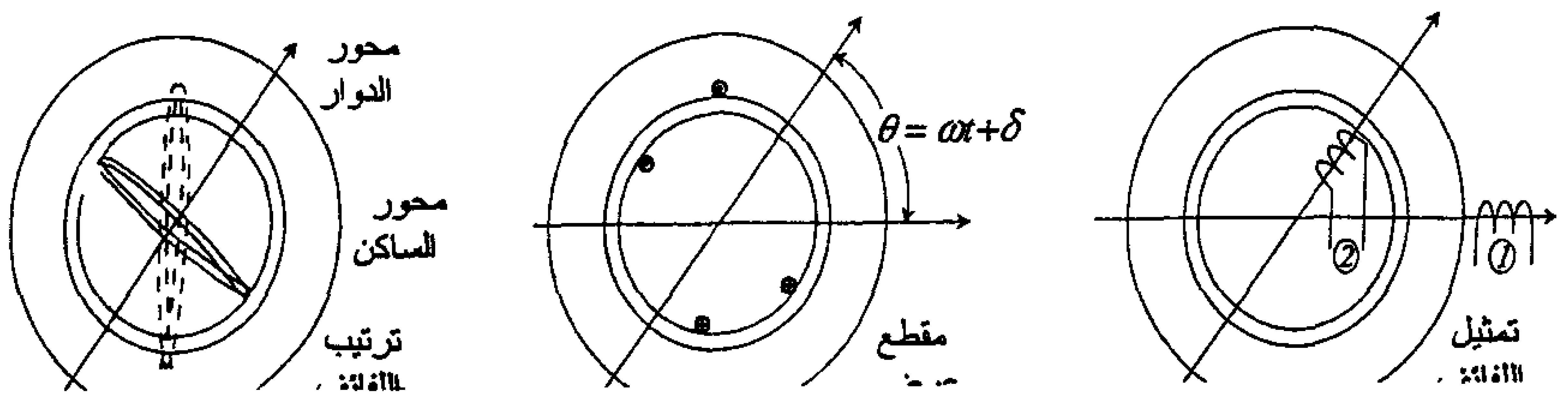
$$= (\partial / \partial \theta)\, [\tfrac{1}{2} L_1 i_1^2 + \tfrac{1}{2} L_2 i_2^2 + M(i_1 i_2)]$$

$$= \tfrac{1}{2}\, i_1^2 dL_1/d\theta + \tfrac{1}{2}\, i_2^2 dL_2/d\theta + i_1 i_2 dM/d\theta \quad (3.66)$$

ويلاحظ ان العزم يعتمد على تغير المحاثات مع موضع الدوار حيث يمثل العنصرين الاولين في المعادلة (3.66) العزوم الناتجة عن تغير المحاثات الذاتية وتعرف بمركبات عزوم الممانعة، بينما يمثل العنصر الثالث العزم الناتج عن تغير المحاثة التبادلية.

2.5.3 العزم في الآلات الدوارة الاسطوانية.

تكتسب معادلات ق.د.ك المحتثة مثل (3.62) و (3.63) والمعادلة العامة للعزم (3.66) اهمية خاصة في وصف السلوك الديناميكي للآلات الكهربائية الدوارة بالرغم مما تتسم به من تعقيد بكونها معادلات تفاضلية لاخطية تضم عدد من المتغيرات والمشتقات وفي الآلة ذات الساكن والدوار الأسطوانية المبينة في الشكل (10) تكون الثغرة الهوائية منتظمة ولا تتغير مع موضع الدوار، وهو ما يجعل الممانعة المحاثات الذاتية ثابتة ويسمح باختصار المعادلة (3.66) بحذف مركبات عزوم الممانعة كما يلي:



الشكل (10) آلة كهربائية دوارة اسطوانية الساكن والدوار.

$$T_m = i_1\, i_2\, dM/d\theta \qquad (3.67)$$

ويحدد موضع الدوار عند أي لحظة t الازاحة الزاوية θ بين محوره ومحور الساكن والتي تحددها سرعة الدوار ω وازاحة δ عند لحظة الصفر. ويمكن الحصول على شروط انتاج العزم بالتعويض عن متغيرات المعادلة (3.67) كدوال جيبيه وكما يلي:

$$\theta = \omega t + \delta,\ M = M_m \cos\theta,\quad i_1 = I_{m1} \cos(\omega_1 t),$$

$$i_2 = I_{m2} \cos(\omega_2 t + \alpha) \qquad (3.68)$$

$$T_m = -I_{m1} I_{m2} M_m \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \alpha) \sin\theta \quad (3.69)$$

$$= -\tfrac{1}{2} I_{m1}\ I_{m2}\ M_m\{\cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \alpha] + \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \alpha]\}\sin(\omega t + \delta)$$

$$= -\tfrac{1}{4} I_{m1}\ I_{m2}\ M_m\{\sin\{[\omega - (\omega_1 - \omega_2)]t + (\delta + \alpha)\} + \sin\{[\omega + (\omega_1 - \omega_2)]t + (\delta - \alpha)\} + \sin\{[\omega - (\omega_1 + \omega_2)]t + (\delta - \alpha)\} + \sin\{[\omega + (\omega_1 + \omega_2)]t + (\delta + \alpha)\}\} \qquad (3.70)$$

ويضم العزم المعطي بالمعادلة (3.70) اربع مركبات تمثل دوال دورية جيبية في الزمن والسرعات مع ازاحات طورية محددة ويتطلب انتاج العزم المستمر ومن تم الدوران المتواصل ان يكون متوسط واحدة على الاقل من هذه المركبات لاتساوى الصفر. ولن يتحقق ذلك الا اذا كانت محصلة

معاملات الزمن الصفر ومحصلة الازاحات الطورية غير الصفر في احدى هذه المركبات. وبملاحظة ان اشارة العزم الناتج لاتغير سوى من اتجاه دوران الآلة يمكن تلخيص شروط انتاج العزم فيما يلي:

$$|\omega| = |\omega_1 \pm \omega_2|, \quad \delta \pm \alpha \neq 0 \qquad (3.71)$$

ومن الشروط المعطاة في المعادلة (3.71) يمكن اشتقاق بعض الحالات التي يمكن عندها انتاج عزم مستمر في الآلة كما يلي :

1- اذا كان تيار الساكن والدوار مستمر تكون $\omega_1 = \omega_2 = \alpha = 0$ ويشترط لانتاج العزم ان تكون θ ثابتة ($\delta = \theta$ و $\omega = 0$). وفي هذه الحالة يتزامن مجالي الساكن والدوار ونحصل على متوسط العزم المبذول بالتعويض في المعادلة (3.69) كما يلي:

$$|T_{av}| = I_1\, I_2\, M_m \sin(\theta_o) = I_1\, I_2\, M_m \sin(\delta) \qquad (3.72)$$

2- اذا كان تيار الساكن متردد وتيار الدوار مستمر تكون $\omega_2 = \alpha = 0$ يشترط لانتاج العزم ان تكون $\delta \neq 0$ و $\omega = \omega_1$. وفي هذه الحالة يتزامن الدوار ومجال الساكن ونحصل على متوسط العزم المنتج بالتعويض في المعادلة (3.70) كما يلي:

$$|T_{av}| = \tfrac{1}{2}\, I_{m1}\, I_2\, M_m \sin(\delta) \qquad (3.73)$$

3 - اذا كان تيار الساكن والدوار متردد بحيث $\omega_1 \neq \omega_2 \neq 0$ يشترط لانتاج العزم ان تكون $|\omega| = |\omega_1 - \omega_2|$ و $\delta + \alpha \neq 0$ وفي هذه الحالة لا يتزامن الدوار ومجال الساكن ونحصل على متوسط العزم المبذول بالتعويض في المعادلة (3.70) كما يلي:

$$|T_{av}| = \tfrac{1}{4}\, I_{m1}\, I_{m2}\, M_m \sin(\delta + \alpha) \qquad (3.74)$$

3.5.3 تصنيف الآلات الكهربائية الدوارة.

يمكن في الآلة الكهربائية الدوارة ان يكون أي من الجزئيين الاسطوانيين الداخلي أو الخارجي ساكناً أو دواراً وأن كان غالباً ما يكون الاطار الخارجي للآلة ساكناً والجزء الداخلي لها متحركاً دواراً. وعادة ما يحتوى المحيط الداخلي للساكن والمحيط الخارجي للدوار على لفائف تختلف طبيعتها والغرض منها بحسب نوع الآلة. وعادة ما يسمى العضو الذي يحتوى على اللفائف التي ينتج فيها الجهد أو العزم بالمنتج (armature) وتسمى هذه اللفائف بلفائف المنتج، بينما يسمى العضو الذي يحتوى على اللفائف التى تنتج المجال المغناطيسي الرئيسي للآلة بعضو المجال (field) وتسمى لفائفه بلفائف المجال. وفي بعض الآلات الصغيرة قد تستخدم مغناطيسات دائمة لتوفير المجال الرئيسي للآلة.

وهناك انواع كثيرة من الآلات الكهربائية الدوارة التي تأخذ العديد من المسميات تبعاً لبنيتها والغرض منها واساسيات عملها. ولكن اغلب الآلات الكهربائية المستخدمة في الحياة العملية يمكن تصنيفها الى ثلاثة انواع اساسية تعرف بالات التيار المستمر (DC machines) وآلات التيار المتردد (AC machines) ثلاثية الاطوار بنوعيها المعروفة بالآلات اللاتزامنية أو الآلات الحثية (induction machines) والآلات التزامنية (synchronous machines) والى جانب هذه الانواع الرئيسية توجد آلات ذات اغراض خاصة مثل آلات التيار المتردد احادية الطور وآلات المغناطيس الدائم وآلات التخلف المغناطيسي ومكابح التيار الدوامي ومحركات الخطوة والتى تعرف بشكل عام بالآلات الخاصة (special machines). ويمكن التمييز بين الانواع الاساسية الثلاثة للآلات الكهربائية كما يلي:

1- آلات التيار المستمر: وفيها يضم العضو الدوار لفائف المنتج بينما يضم العضو الساكن لفائف المجال التى تغذى مباشرة بالتيار المستمر

لانشاء المجال المغناطيسي الرئيسي للآلة. وفي المولد يؤدي دوران المنتج الى انتاج جهد احادى الاتجاه بين اطرافه، بينما تؤدى تغذية المنتج بالتيار المستمر الى انتاج العزم المبذول على منتج المحرك كما في المعادلة (3.72). وبالرغم من أن الانتشار الواسع لاستخدام التيار المتردد ورخص دوائر التقويم الالكترونية قد ادى في الوقت الحاضر الى جعل استخدام مولدات التيار المستمر مقتصراً على بعض التطبيقات الخاصة، فإنه هناك الكثير من التطبيقات التي لازال استخدام محركات التيار المستمر يوفر فيها بعض المزايا الاقتصادية والتقنية.

وتمتاز آلة التيار المستمر بخاصية تعدد الاستعمالات (versatility) حيث يمكن الحصول على نطاق واسع من خصائص الجهد/التيار أو العزم/السرعة المتنوعة من التوصيلات المختلفة للفائف المجال. وتمتاز المحركات بصفة خاصة بخصائص تحميل ممتازة تمكن من التحكم في سرعتها على نطاق تحميل واسع وبسهولة نسبية. والى جانب استخدام المحركات الكبيرة في مختلف العمليات الصناعية مثل ادارة المراوح والمضخات والروافع والمدلفنات، فهي لازالت منتشرة في تطبيقات الجر والسحب كما هو الحال في السيارات والقاطرات الكهربائية. كما تستخدم المحركات الصغيرة على نطاق واسع في انظمة التحكم والمراقبة. وهكذا فإن آلات التيار المستمر تلعب دوراً ذو أهمية كبرى في الصناعة.

2- الآلات التزامنية: وهي آلات تيار متردد يتم فيها وضع لفائف المنتج في العضو الساكن ووضع لفائف المجال في العضو الدوار وتتم اثارتها بتيار مستمر لانشاء المجال المغناطيسي الرئيسي. وفي الآلة ثنائية الاقطاب يؤدى دوران عضو المجال الى توليد جهد متردد في لفائف المنتج يكون تردده مساوياً لسرعة الدوار والى ذلك تعود تسمية الآلات التزامنية حيث يعطى العزم المبذول بالمعادلة (3.73). ويمر الجهد

المتولد فى لفائف المنتج بدورة موجية كاملة كلما عبرها زوج من اقطاب المجال وهو بذلك يمر بعدد من الدورات الموجبة يساوي عدد ازواج اقطاب المجال لكل دورة ميكانيكية.

وقد يكون عضو المجال الدوار ذو اقطاب بارزة (salient poles) ذات لفائف مركزة أو يكون اسطواني (cylindrical) ذو لفائف موزعة في زوج واحد من الاقطاب في العادة. ويعود الاختيار بين الدوار بارز الاقطاب والدوار الاسطواني الى تردد التيار وسرعة المحرك الاولى والاعتبارات الميكانيكية عند التشغيل. ومن اشهر الآلات التزامنية المستخدمة في الحياة العملية المولدات التزامنية المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية الضخمة في محطات القوى.

3- الآلات الحثية: وهي آلات تيار متردد يضم عضوها الساكن اللفائف الرئيسية للآلة لتقوم بوظيفة المنتج اضافة الى احتثاث ق.د.ك لفائف المجال في العضو الدوار التي عادة ما تكون مغلقة ليس لها اتصال خارجي. ويؤدى تدفق التيار المتردد في لفائف الساكن الى انشاء مجال مغناطيسي في الثغرة الهوائية يدور بسرعة التزامن. وبذلك تحمل لفائف الدوار تيار متردد تدفعه ق.د.ك المحتثة فيها بواسطة المجال الدوار للفائف الساكن كما في المحاولات، ولذلك تعود تسمية الآلات الحثية حيث يؤدى التفاعل بين مجال العضو الساكن وتيار العضو الدوار الى انتاج عزم المحرك الذى يعطي بالمعادلة (3.74).

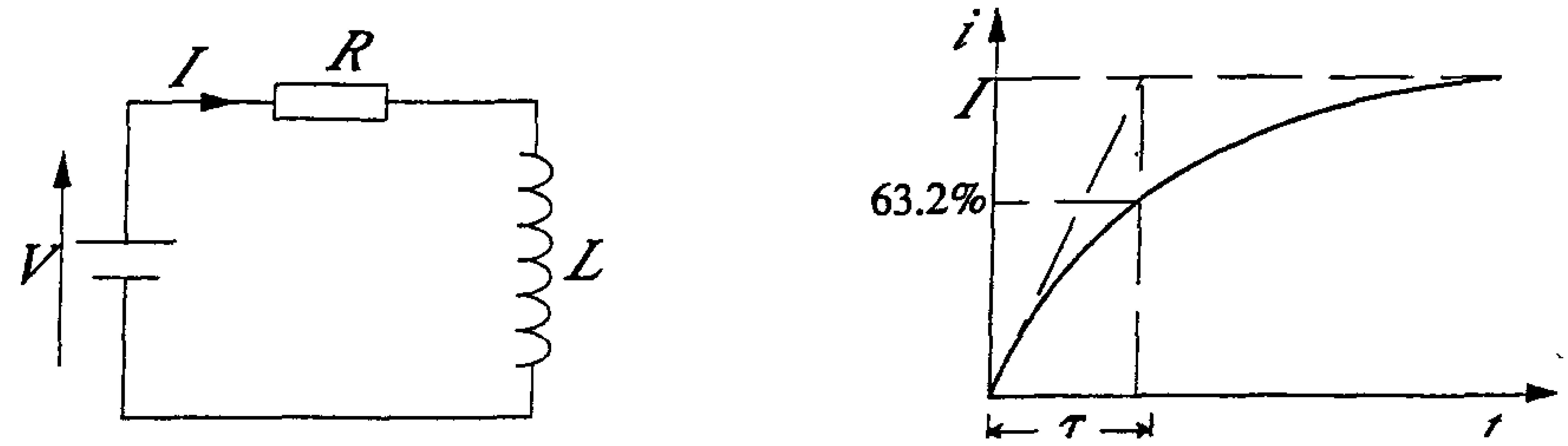
وتقل سرعة دوران العضو الدوار عن سرعة التزامن بنسبة تسمى بمعامل الانزلاق (slip) ويكون تردد تيار لفائف الدوار اقل من تردد تيار العضو الساكن حيث يساوى الاول حاصل ضرب الاخير في معامل الانزلاق. وتعد المحركات الحثية من اكثر الآلات الكهربائية انتشاراً حيث غالباً ما تكون لفائف العضو الدوار عبارة عن قضبان مقصورة عند اطرافها بحلقات

طرفية فيما يسمى بالعضو الدوار ذو القفص السنجابي (squirrel-cage rotor). واحياناً يكون العضو الدوار ذو لفائف عادية متعددة الاطوار فيما يعرف بالعضو الدوار ذو النوع الملفوف (wound rotor).

6.3. السلوك العابر لانظمة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة .

يحدث تزويد الطاقة لاجهزة ومعدات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة استجابة محددة تعتمد في طبيعتها على معاملات المنظومة. ونظراً لوجود عناصر متفاعلة خازنة للطاقة مثل الملفات والمكثفات في النظام الكهربائي والكتل والنوابض في النظام الميكانيكي، فإن استجابة المنظومة للتغيرات الفجائية في الدخل/الخرج تمر بحالة عابرة (transient-state) انتقالية قبل أن تصل في النهاية الى حالة ثابتة (steady-state) جديدة. ويرتبط سلوك المنظومة اثناء الحالة العابرة اساساً بالتغيرات الناتجة في الطاقة المخزونة في عناصر تخزين الطاقة حيث عادة ما يتطلب تحديد طبيعة هذا السلوك حل المعادلات التفاضلية للحالة.

ولدراسة الاستجابة العابرة لمنظومة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة التي تعتمد على المجال المغناطيسي في تخزين الطاقة، يمكن تمثيل النظام الكهربائي للمنظومة بدائرة كهربائية تحتوى على محاثة L ومقاومة R على التوالي كما في الشكل (11). فعند توصيل الدائرة في لحظة الصفر بمصدر تيار مستمر جهده V يمكن من قانون فرادى وقانون كيرتشوف الثاني الحصول على المعادلة التفاضلية التي تعبر عن الاستجابة العابرة للدائرة وتعطى التيار اللحظى i للدائرة كما يلي:



شكل (11) انماط الاستجابة الكهربائية العابرة لمحولات الطاقة الخطية.

$$L\, di/dt + R\, i = V \qquad (3.75)$$

ولآن التيار العابر ينتهي الى القيمة الثابتة $(I=V/R)$، يمكن باعادة ترتيب المعادلة (3.75) وتكامل طرفيها الحصول على ما يلي:

$$(L/R)\, di = (V/R - i)\, dt$$

$$[1/(V/R - i)]\, di = (R/L)\, dt$$

$$\int [1/(I - i)]\, di = \int (R/L)\, dt$$

$$-\ln (I - i) + A = (R/L)\, t \qquad (3.76)$$

وبالتعويض عن $i=0$ عند $t=0$ في المعادلة (3.76) يكون ثابت التكامل $A=ln(i)$ ونحصل على حل المعادلة (3.75) كما يلي:

$$-\ln (I - i) + \ln (I) = (R/L)\, t$$

$$\ln [I / (I-i)] = (R/L)\, t$$

$$I / (I-i) = e^{(R/L)t}$$

$$(I-i) / I = e^{-(R/L)t}$$

$$i = I\,(1-e^{-t/\tau}) \qquad (3.77)$$

$$\tau = L/R$$

ويمثل الثابت الزمني τ المدة يصل التيار بنهايتها الى قيمته الثابتة I اذا ما استمر بمعدل تغيره الابتدائي حيث يتضح بالتعويض عن $t=\tau$ في المعادلة (3.77) الاسية ان التيار سيصل الى 63.2٪ من I خلال هذه المدة وكما هو مبين في الشكل (11). ومن الجدير بالملاحظة في الدوال الاسية ان الزمن اللازم للوصول الى الحالة الثابتة النهائية يتناسب طردياً مع الثابت الزمني. ولقد تم في هذه الحالة تمثيل الاستجابة العابرة للنظام الذي يضم عنصر واحد لتخزين الطاقة بمعادلة تفاضلية من الرتبة الاولى، بينما يتطلب تمثيل استجابة الانظمة متعددة عناصر التخزين معادلة ذات رتبة اعلى أو مجموعة من معادلات الرتبة الاولى.

1.6.3 ديناميكا انظمة الحركة الخطية.

يمكن دراسة الاستجابة العابرة للنظام الميكانيكي لمنظومة التحويل الكهروميكانيكي للطاقة بنفس اسلوب دراسة النظام الكهربائي. وفي انظمة الحركة الخطية غير المقيدة تكون المعاملات الاساسية للنظام كتلة الجزء المتحرك M التي تناظر المحاثة وتمثل عنصر تخزين الطاقة للنظام ومعامل الاخماد K_d الذي يناظر مقاومة الملف ويمثل تأثير مقاومات الاحتكاك واضطراب الهواء. ومن اساسيات الميكانيكا يمكن عند تطبيق قوة F على كتلة الجزء المتحرك في لحظة الصفر تمثيل السلوك الديناميكي للنظام الميكانيكي بمعادلة تفاضلية تعبر عن الاستجابة العابرة وتعطى السرعة اللحظية v للنظام . وبملاحظة التناظر بين القوة والجهد والتناظر بين السرعة والتيار تكون استجابة النظام كما في الشكل (11) ويمكن كتابة معادلة الحركة وحلها كما يلي:

$$M\,dv/dt + K_d\,v = F_m \qquad (3.78)$$

$$v = v_s\,(1-e^{-t/\tau}) \qquad (3.79)$$

$$v_s = F_m/K_d\ , \qquad \tau = M/K_d \qquad (3.80)$$

وفي الحيـــاة العمليـــة غالبـــاً مـــا تكـــون منظومـــة التحويـــل الكهروميكـانيكي للطاقـة ذات الحركـة الخطيـة مقيـدة وغيـر متواصـلة الحركة. وعـادة مـا تقيـد حركـة هـذه الانظمـة بواسـطة نـابض يختـار لموازنـة القـوة الناتجـة عـن عمليـة تحويـل الطاقـة عنـد نهايـة المـدى، ويميزهـا وجـود عنصرين لتخزين الطاقة وهمـا الكتلة والنـابض مع مراعات ان شـد النـابض يتناسب مـع الازاحـة الخطيـة ولـيس السـرعة. وبينمـا يمكـن الحصـول علـى استجابة النظـام الـذي يضـم عنصـر واحـد لتخـزين الطاقـة بمعادلـة تفاضـلية أحاديـة الرتبـة ،فـإن اسـتجابة النظـام الـذي يضـم عنصـرين مختلفين لتخـزين الطاقة يتطلب حل معادلـة تفاضـلية مـن الرتبـة الثانيـة. وحيـث أن شـد النـابض يساوي حاصل ضرب ثابت النـابض في المسـافة والتـى بـدورها تسـاوي تكامـل السرعة، يمكـن ا[illegible]ة كتابة المعادلة (3.78) لتمثيل الاستجابة الديناميكية العابرة للنظام الميكـانيكى السـابق اذا مـا تم تقيـد حركتـه الخطيـة بنـابض ثابتة K_s كما يلي:

$$M\, dv/dt + K_d\, v + K_s \int v\, dt = F_m \qquad (3.81)$$

وعنـد ثبـوت القـوة F يمكـن بتفاضـل طـرفي المعادلـة (3.81) اعـادة كتابة في الصيغة القياسية لمعادلة الرتبة الثانية التفاضلية كما يلي:

$$M\, d^2v/dt^2 + K_d\, dv/dt + K_s\; v = 0 \qquad (3.82)$$

ويعتمد حل المعادلة الخطيـة (3.82) علـى طبيعـة جـذور المعادلـة والـتي يمكـن الحصـول عليهـا بحـل المعادلـة المميـزة الجبريـة للنظـام. ويمكـن مـن المعادلة (3.82) كتابة المعادلة المميـزة للنظـام بـالتعويض عـن $\lambda = d/dt$ ومـن تم الحصول على الجذور λ كما يلي:

$$M\lambda^2 + K_d\,\lambda + K_s = 0 \qquad (3.83)$$

$$\lambda = -(K_d/2M) \pm \sqrt{[(K_d/2M)^2 - K_s/M]} \qquad (3.84)$$

$$\lambda = -\alpha \pm \beta \quad \Rightarrow \quad \lambda_1 = -\alpha + \beta, \quad \lambda_2 = -\alpha - \beta \qquad (3.85)$$

$$\alpha = -K_d / 2M \;, \qquad \beta = \sqrt{[(K_d / 2M)^2 - K_s / M]} \qquad (3.86)$$

ويضم الحل الكامل للمعادلة (3.81) الحل الثابت والاستجابة الطبيعية العابرة التي يعتمد نمطها على جذور المعادلة المميزة (3.83). ويمكن ان تكون الجذور حقيقية لتشير الى انماط استجابة غير متذبذبة أو أن الجذور مركبة لتشير الى انماط استجابة متذبذبة. ويمكن تحديد انماط الاستجابة الطبيعية العابرة وفقاً لقيم المعامل β كما يلي (انظر الشكل (12)) :

1 - اذا كانت β صفر تكون الجذور λ_2 , λ_1 حقيقية متساوية والاستجابة غير متذبذبة وحرجة الاخماد ويكون الحل:

$$v_n = e^{\alpha t}(A_1 + A_2 t) \;, \qquad v = v_s - v_n \qquad (3.87)$$

2- اذا كانت β حقيقية تكون الجذور λ_2 , λ_1 حقيقية غير متساوية والاستجابة غير متذبذبة مفرطة الاخماد ويكون الحل.

$$v_n = e^{\alpha t}(A_1 e^{\beta t} + A_2 e^{-\beta t}) \;, \qquad v = v_s - v_n \qquad (3.88)$$

3- اذا كانت β تخيلية تكون الجذور λ_2 , λ_1 مركبة (مرافقة) غير متساوية والاستجابة متذبذبة ناقصة الاخماد ويكون الحل:

$$v_n = e^{\alpha t}(A_1 cos\beta + jA_2 sin\beta) \;, \; v = v_s - v_n \qquad (3.89)$$

2.6.3 ديناميكا انظمة الحركة الدورانية.

تمثل الآلات الكهربائية الدوارة اهم وسائل التحويل الكهروميكانيكي المتواصل للطاقة حيث الحدود لبداية ونهاية مدى الحركة. ويمكن دراسة الاستجابة الديناميكية العابرة للآلات الكهربائية الدوارة بنفس الأسلوب المستخدم لدراسة انظمة الحركة الخطية. ومن

اساسيات ديناميكا الكتل الدوارة يلاحظ التناظر بين كميات الحركة الخطية والحركة الدورانية حيث يناظر عزم القصور J الكتل M وتناظر السرعة الزاوية ω السرعة v ويناظر عزم التدوير T_m القوة F وتكون الاستجابة اسية كما في الشكل (11). وعليه يمكن تمثيل السلوك الديناميكي لدوار الآلة بمعادلة تفاضلية مماثلة للمعادلة (3.78) والتعبير عن حلها كما يلي:

$$J\, d\omega/dt + K_d\, \omega = T_m \qquad (3.90)$$

$$\omega = \omega_s\, (1-e^{-t/\tau}) \qquad (3.91)$$

$$\omega_s = T_m/K_d\ , \qquad \tau = J/K_d \qquad (3.92)$$

وفي الاجهره ذات الحركة الدورانية المقيدة مثل اجهزة القياس ذات الملف المتحرك والتى عادة ما تحدد حركتها بحيث لايتجاوز مداها نصف دورة بواسطة نابض حلزوني مناسب ليمثل عنصر آخر لتخزين الطاقة اضافة لعزم القصور الذاتي للكتلة الدوارة. وعلية تكون معادلة الاستجابة الديناميكا للدوار والحل الكامل والمعادلة المميزة وجذورها المركبة كما يلي:

$$J\, d\omega/dt + K_d\, \omega + K_s \int \omega\, dt = T_m \qquad (3.93)$$

$$J\, d^2v/dt^2 + K_d\, d\omega/dt + K_s\omega = 0 \qquad (3.94)$$

$$\omega_n = \omega_s - e^{\alpha t}(A_1 cos\beta + jA_2 sin\beta) \qquad (3.95)$$

$$J\lambda^2 + K_d\, \lambda + K_s = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda = -\alpha \pm \beta \qquad (3.96)$$

$$\alpha = -K_d/2J\ , \qquad \beta = \sqrt{[K_s/J - (K_d/2J)^2]} \qquad (3.97)$$

وطبقاً لقيم J و K_d و K_s ستدل الجذور الحقيقية للمعادلة المميزة للنظام على استجابة عابرة ذات دالة اسية ونمط غير متذبذب، بينما تشير

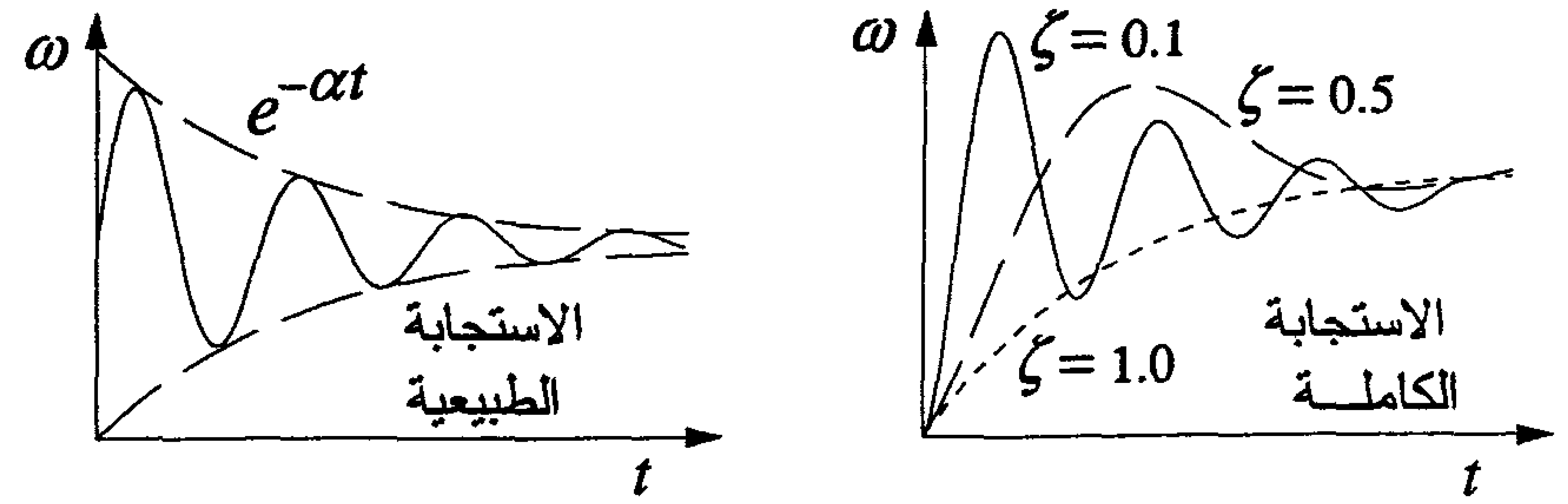
الجذور المركبة الى نمط استجابة متذبذبة ذات دالة آسية تتضمن ذبذبة جيبية كما في المعادلة (3.95) والشكل (12). ويمكن التعبير عن معادلة الخصائص للنظام وجذورها المركبة في الصيغة العامة لاستجابة النظم ثنائية الرتبة كما يلي:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0 \qquad (3.98)$$

$$\lambda = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)} \qquad (3.99)$$

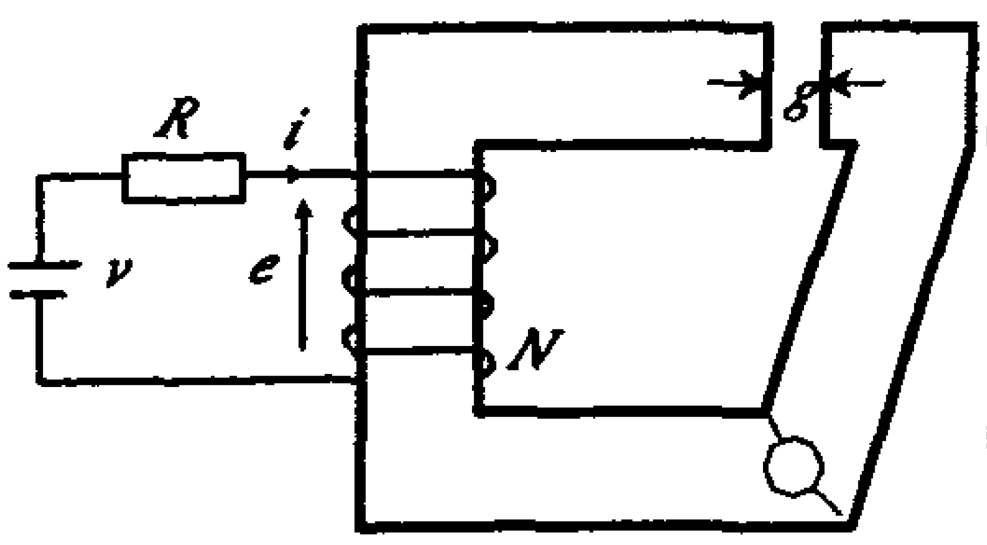
وتمثل ω_n التردد الزاوي الطبيعي للذبذبة و ζ نسبة الاخماد الذي يكون ناقص عند $\zeta<1$ وزائد عند $\zeta>1$ وحرج عند $\zeta=1$. ووفقاً لقيم معاملات النظام يمكن من المعادلتين (3.96) و (3.98) التعبير عن ω_n والتردد الزاوي المخمد ω_d كما يلي:

$$\omega_n = \sqrt{(K_s/J)}\ ,\omega_d = \omega_n/\sqrt{(1-\zeta^2)}\ ,\zeta = K_d/\sqrt{(4JK_s)} \qquad (3.100)$$



شكل (12) انماط الإستجابة الميكانيكية الكاملة والعابرة للآلة الدوارة.

أمثلة محلولة



1 - يبين الشكل المقابل مرحل كهرومغناطيسي تمثل الدالة $i=(\psi g/0.09)^2$ منحنى علاقة i-ψ لمادة لبه في نطاق مدى التشغيل $0< i<4$ A للتيار و $3<g<10$ cm للتغرة

الهوائية. فأذا كان تيار الملف A 3 وطول التغرة الهوائية cm 5 احسب القوة المؤثرة على الجزء المتحرك بدلالة الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي اولا" والطاقة المصاحبة ثانيا". [124.7077 N]

الحل :

$i=3A$, $g=0.05m$

$i=(\psi g/0.09)^2 \rightarrow \psi=(0.09/g) \quad i^{1/2} \qquad =(0.09/0.05)*(3)^{1/2}$
$=3.12$ wb

لايجاد القوة المؤثرة على الجزء المتحرك بدلالة الطاقة المخزونة :

$$\omega_f = \int_0^{\psi} i d\psi = \int_0^{\psi} \left(\frac{\psi g}{0.09}\right)^2 \, d\psi = \frac{1}{3}\left(\frac{g}{0.09}\right)^2 \psi^3$$

$$f_m = -\frac{\partial \omega_f(\psi, g)}{\partial g}\Big|_{\psi=const} = \frac{-2\psi^3}{3(0.09)^2}\, g = -\frac{2*(3.12)^3}{3*(0.09)^2} * 0.05 = -124.7\, N.m$$

لايجاد القوة المؤثرة على الجزء المتحرك بدلالة الطاقة المصاحبة :

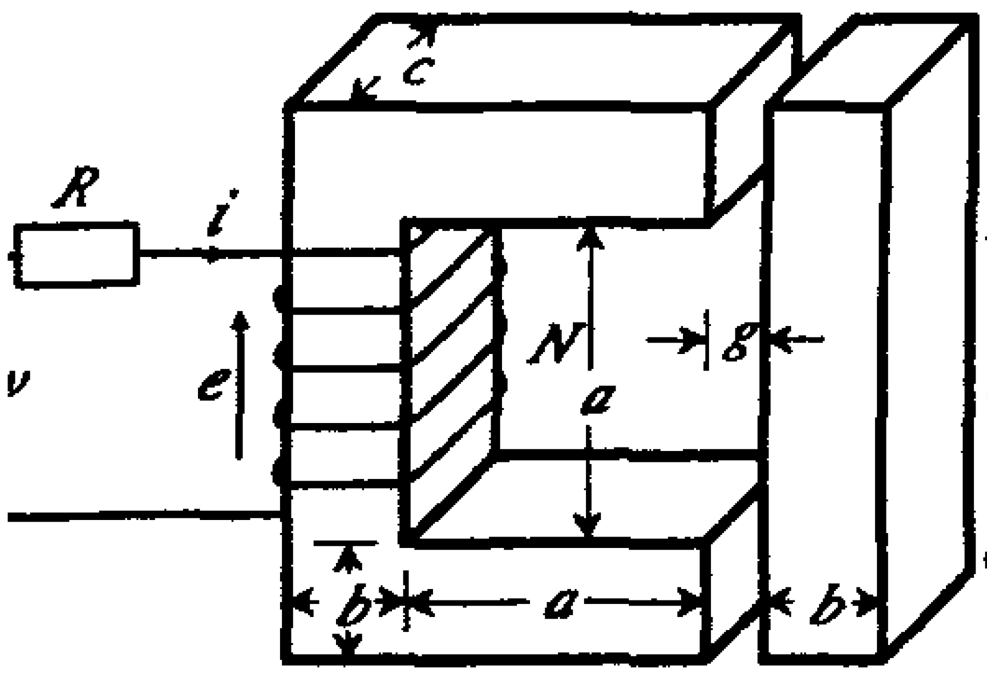
$$\acute{\omega}_f = \int_0^i \psi di = \int_0^i \frac{0.09}{g}\, i^{1/2}\, di = \frac{2*0.09}{3*g} i^{\frac{3}{2}}$$

$$f_m = \frac{\partial \acute{\omega}_f(i, g)}{\partial g}\Big|_{i=const} = \frac{-2*0.09 i^{3/2}}{3}\, g^{-2}$$

وتبين تساوى القوة الناتجة فى الحالتين حيث تشير الاشارة السالبة الى ان القوة تعمل على نقص الثغرة .

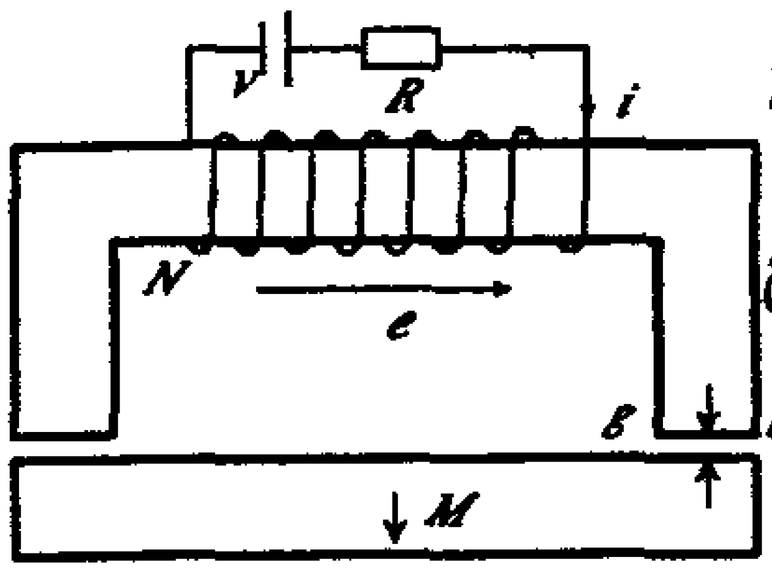
2 – يبين الشكل المقابل مرحل كهرومغناطيسي ابعاد لبه

$a=10\ cm$ و $b=5\ cm$ و $c=10\ cm$ و $g=5$

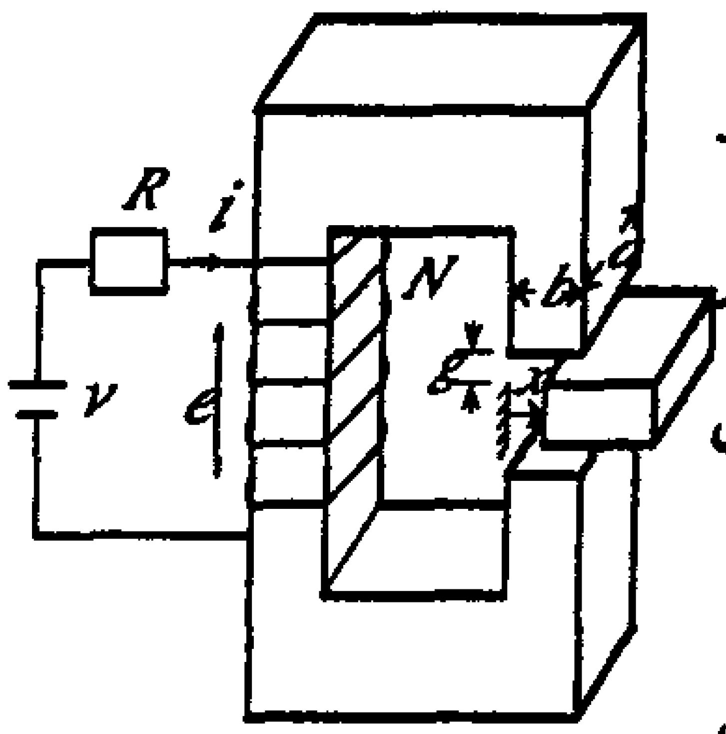


mm وعدد لفات الملف $N=250$ لفة ومقاومته $R=5\ \Omega$. فأذا كان الفيض الناشئ في اللب $5\ mWb$ احسب تيار وجهد المصدر والطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي لكل من اللب والثغرة الهوائية والطاقة المخزونة الكلية عند ثبوت طول الثغرة الهوائية (اعتبر النفاذية النسبية لمادة اللب 1145). [33.5 A, 167.5 V, 1.0425 J, 19.8944 J, 20.9369 J]

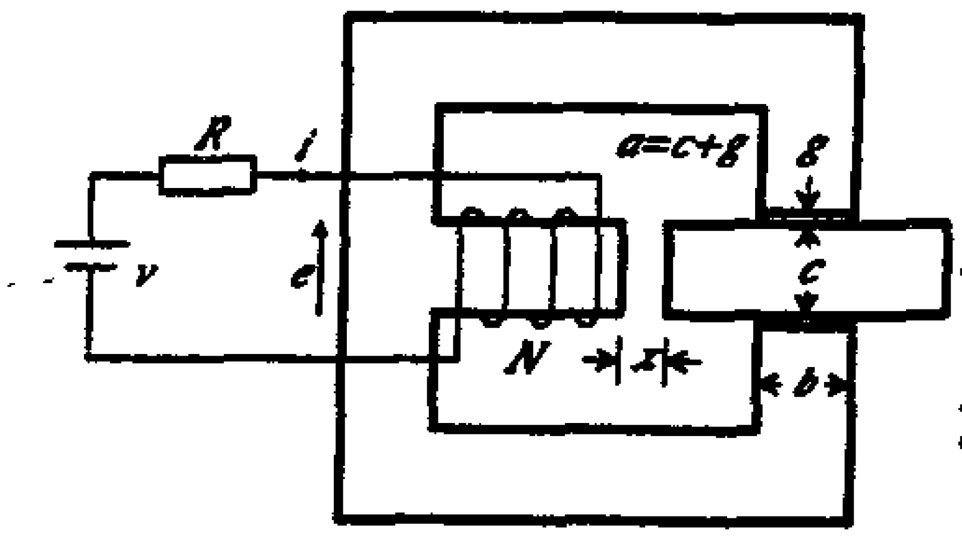
3 - يبين الشكل المقابل رافعة كهرومغناطيسية



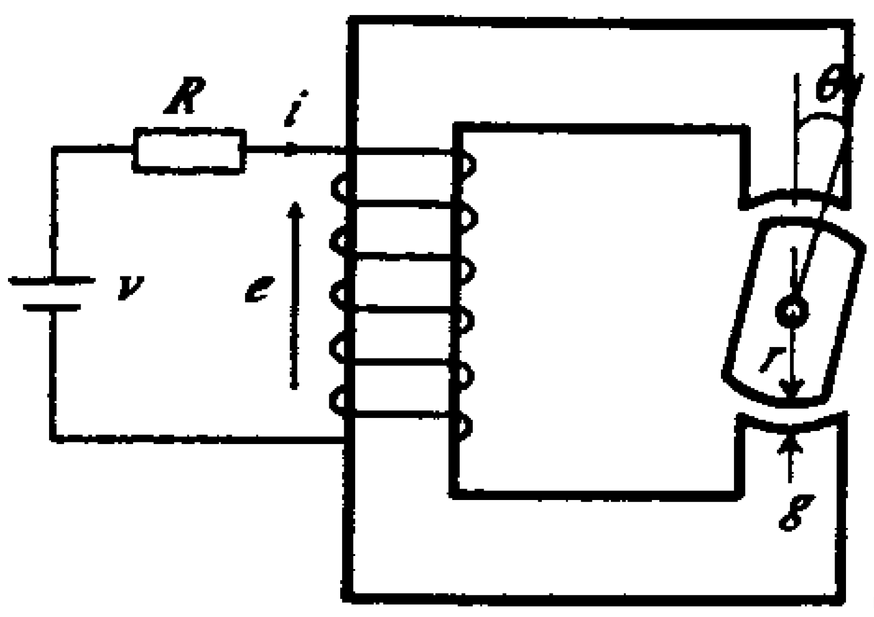
عدد لفات ملفها 300 لفة ومقاومته 6 Ω والمقطع العرضي للجزئين الساكن والمتحرك مربع طول ضلعه 6 cm. فأذا كان جهد مصدر الاثارة 120 V وطول الثغرة الهوائية g=5 mm، اهمل الممانعة المغناطيسية للب وتهذب وتسرب الفيض واحسب كل من الطاقة المخزونة في النظام وقوة الرفع عند استخدام مصدر تيار مستمر وعند استخدام مصدر تيار متردد 60 Hz.
[8.14 J, 1628.7 N, 1.08 J, 216.3



4 - يـبين الشـكل المقابـل مغنـاطيس كهربـائي ذو مكـبس مسـتطيل المقطـع يفصـله عـن اللـب مـادة غـير مغناطيسـية حيـث يمكـن اعتبـار نفاذيـة مـادة اللـب والمكبس لانهائية. اثبث ان محاثة المرحل كدالة في x تعطـى بالعلاقـة $L(x)=\mu_o a(b-x)N^2/2g$ واذا كانت ابعاد الثغرة الهوائية a=10 cm و b=15 cm و g=2 mm وعدد لفات 1000 لفة والتيار 10 A والملف غير فاقد، احسب القوة المؤثرة على المكبس المتحرك بدلالة طاقة المجال وبدلالة الطاقة المصاحبة.
[1570 N]



5 - يبين الشكل المقابل مقطع طولي لمغناطيس كهربائي ذو مكبس اسطواني وملف لولبي مغلف بأطار حديدي اسطواني يفصله عن المكبس مادة غـير مغناطيسـية. اثبـث ان محاثـة الملـف تعطـى بالعلاقـة $L(x)=\pi\mu_o abc^2N^2/(4abx+gc^2)$ عنـد اهمـال ممانعـة الحديـد. واذا كانـت ابعـاد المغناطيس c=38 mm و b=40 mm و g=2 mm و x=5 mm وعدد لفات ملفه غير الفاقد 500 لفة وتياره 10 A، احسب القوة المؤثرة على المكبس. [599.5 N]



6 - يبين الشكل المقابل مقطع لمحرك ممانعة بدائي يمكن اهمال ممانعة لبه الحديدي. اهمل تهذب وتسرب الفيض واشتق العلاقة الممكن استخدامها لحساب العزم المبدول على الدوار بدلالة كثافة الفيض في التغرة الهوائية وطولها g والطول المحوري للساكن والدوار l.
واذا كانت القيمة العظمى لكثافة فيض التغرة والتي يحددها تشبع الحديد $2\ T$ وابعاد المحرك $r=3\ cm$ و $l=3\ cm$ و $g=2\ mm$ ،
احسب القيمة العظمى للعزم المبدول.
[$T=B_m^2 gl(r-0.5g)/\mu_o$, 5.92 Nm]

الفصل الرابع

الآت التيار المستمر

1.4 مقدمة

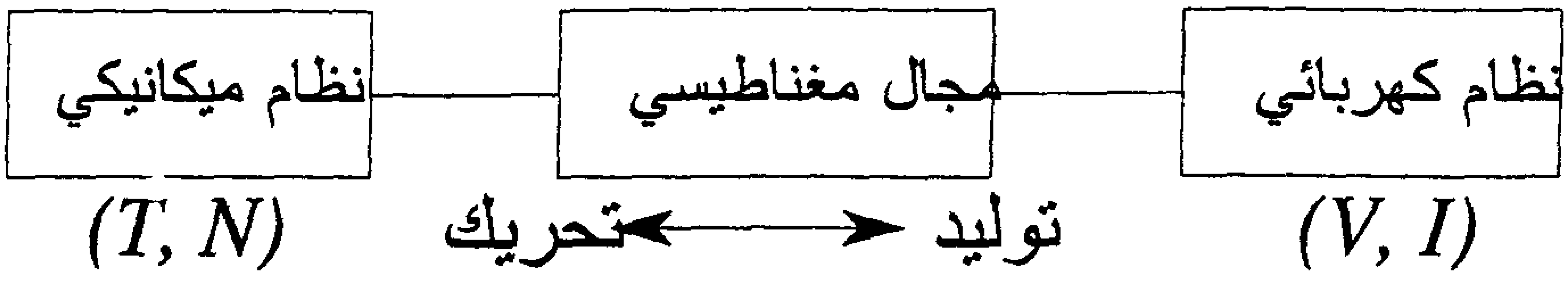
بينما يتم تزويد بعض الاجهزة المنزلية والصناعية بالطاقة الكهربائية بشكل مباشر مثل ما هو الحال في المصابيح والمدافئ، فإن الكثير من الاجهزة الاخرى تتطلب تزويدها بالطاقة في صورتها الميكانيكية كما هو الحال في المراوح والمضخات. ويمكن التحويل من احدى صور الطاقة الى صورة اخرى بواسطة اجهزة تحويل الطاقة (energy converters) حيث تعرف الاجهزة التي تقوم بتحويل الطاقة بين صورها الكهربائية والميكانيكية بشكل متواصل بالآلات الكهربائية (electrical machines). وتسمى عملية التحويل في هذه الحالة بالتحويل الكهروميكانيكي للطاقة (electromechanical energy conversion). وهكذا فإن الآلة الكهربائية تمثل حلقة الوصل بين نظامين احدهما كهربائي والآخر ميكانيكي حيث تسمى الآلة بالمولد (generator) اذا كانت تحول الطاقة الميكانيكية الى كهربائية وتسمى بالمحرك (motor) اذا كانت تحول الطاقة الكهربائية الى ميكانيكية مع امكانية استخدام نفس الآلة للغرضين.

وبينما يمثل الجهد والتيار المعاملات (parameters) الاساسية في النظام الكهربائي للآلة الكهربائية، فإن العزم والسرعة يمثلان المعاملات المناظرة في النظام الميكانيكي للآلة. ويمثل المجال المغناطيسي للآلة الكهربائية وسيلة او وسط الاقتران بين النظامين حيث تتم عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة خلال هذا الوسط كما في الشكل (1). وتعود عملية تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية او العكس أساساً الى الظاهرتين الكهرومغناطيسيتين التاليتين:

1 - ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي (elerctomagnetic induction) التي تؤدي الى احتثات ق.د.ك في موصل عند تحركه في مجال مغناطيسي حيث تحدد قاعدة اليد اليمنى لفليمنج اتجاه ق.د.ك المحتثة في موصل يقطع عموديا مجال مغناطيسي.

2 - ظاهرة القوة الكهرومغناطيسية (electromagnetic force) التي يتعرض لها الموصل الحامل للتيار نتيجة لوجوده في مجال مغناطيسي حيث تحدد قاعدة اليد اليسرى اتجاه القوة المؤثرة على الموصل العمودي على المجال المغناطيسي.

وفي الواقع تحدث الظاهرتين معا" اثناء عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة حيث نجد ان توصيل المحرك بالمصدر يؤدي الى تدفق التيار في الموصلات الموجودة في المجال المغناطيسي للآلة مما يعرضها الى قوة كهرومغناطيسية. وسيؤدي ذلك الى انتاج عزم كهرومغناطيسي يحاول ادراة العضو الحر الحركة (الذي يضم الموصلات) بسرعة معينة. ونتيجة لدوران الموصلات خلال المجال المغناطيسي ستحتث فيها ق.د.ك خلفية معاكسة للجهد تحاول اعاقة تدفق التيار خلالها. وسيحدث العكس في حالة المولد حيث تتم ادارة العضو الدوار بواسطة آلة خارجية تعرف بالمحرك الاولي (prime mover) ويؤدي ذلك الى وجود حركة نسبية بين الموصلات والمجال المغناطيسي مما ينتج عنها احتثات ق.د.ك في تلك الموصلات. وعند التحميل يؤدي تدفق التيار في الموصلات الموجودة في المجال المغناطيسي الى انتاج عزم دوران مضاد لعزم المحرك الاولي. وهكذا يتضح ان المجال المغناطيسي يلعب الدور الاساسي في انتاج العزم وتوليد الجهد في حالتي المحرك والمولد.



الشكل (1) التحويل الكهروميكانيكي للطاقة

2.4 تصنيف الآلات الدوارة.

تتكون الآلات الكهربائية الدوارة بمختلف انواعها اساسا من جزئين اسطوانيين رئيسيين يسمى احدهما بالعضو الساكن (stator) غير المتحرك والذي عادة ما يكون الاطار الخارجي، بينما يسمى الآخر بالعضو الدوار (rotor) الحر الحركة والذي عادة ما يكون الجزء الداخلي. ويحتوي المحيط الداخلي للعضو الساكن والمحيط الخارجي للعضو الدوار على لفائف تختلف طبيعتها والغرض منهما بحسب نوع الآلة الكهربائية. وعادة ما يسمى العضو الذي يحتوي على اللفائف التي ينتج فيها الجهد او العزم بالمنتج (armature) وتسمى هذه اللفائف بلفائف المنتج (armature winding)، بينما يسمى العضو الذي يحتوي على اللفائف التي تنتج المجال المغناطيسي الرئيسي للآلة بعضو المجال (field) وتسمى هذه اللفائف بلفائف المجال (field winding). وفي بعض الآلات الصغيرة قد تستخدم مغناطيسات دائمة (permanent magnets) لتوفير المجال الرئيسي للآلة.

وهناك انواع كثيرة من الآلات الكهربائية الدوارة التي تأخذ العديد من التسميات تبعا" لبنيتها والغرض منها واساسيات عملها. ولكن اغلب الآلات الكهربائية المستخدمة في الحياة العملية يمكن تصنيفها الى ثلاثة انواع اساسية تعرف بآلات التيار المستمر (DC machines) وآلات التيار المتردد (AC machines) وتضم الآلات التزامنية (synchronous machines) والآلات الحثية (induction machines). والى جانب هذه الانواع توجد آلات اخري ذات اغراض خاصة مثل آلات المغناطيس الدائم

وآلات التخلف المغناطيسي ومكابح التيار الدوامي ومحركات الخطوة حيث عادة ما يشار اليها جميعا" بالآلات الخاصة (special machines). ويمكن باختصار وصف الانواع الاساسية الثلاثة للآلات الكهربائية كما يلي:

1 - آلات التيار المستمر: وفيها يضم العضو الساكن لفائف المجال بينما يضم العضو الدوار لفائف المنتج. وتغذى لفائف المجال مباشرة بالتيار المستمر لانشاء المجال المغناطيسي الرئيسي للآلة. وفي المولد يؤدي دوران العضو الدوار الى انتاج جهد احادي الاتجاه بين اطرافه، بينما تؤدي تغذية المنتج بالتيار المستمر الى انتاج العزم اللازم لادارة منتج المحرك. وبالرغم من ان الانتشار الواسع لاستخدام التيار المتردد ورخص دوائر التقويم الالكترونية قد ادى في الوقت الحاضر الى جعل استخدام مولدات التيار المستمر مقتصرا" على بعض التطبيقات الخاصة، فإنه هناك الكثير من التطبيقات التي لايزال استخدام محركات التيار المستمر يوفر فيها بعض المزايا الاقتصادية والتقنية.

وتمتاز آلة التيار المستمر بخاصية تعدد الاستعمالات (versatility) حيث يمكن الحصول على نطاق واسع من خصائص الجهد/التيار او العزم/السرعة المتنوعة من التوصيلات المختلفة للفائف المجال. وتمتاز المحركات بصفة خاصة بخصائص تحميل ممتازة تمكن من التحكم في سرعتها على نطاق تحميل واسع وبسهولة نسبية. والى جانب استخدام المحركات الكبيرة في مختلف العمليات الصناعية مثل ادرة المراوح والمضخات والروافع والمدلفنات، فهي لازالت منتشرة في تطبيقات الجر والسحب كما هو الحال في السيارات والقاطرات الكهربائية. كما تستخدم المحركات الصغيرة على نطاق واسع في انظمة التحكم والمراقبة. وهكذا فإن آلات التيار المستمر تلعب دورا" ذو اهمية كبرى في الصناعة.

2 - الآلات التزامنية: وهي آلات تيار متردد يتم فيها وضع لفائف المنتج في العضو الساكن ووضع لفائف المجال في العضو الدوار وتتم اثارتها بتيار مستمر لانشاء المجال المغناطيسي الرئيسي. وفي الآلة ثنائية الاقطاب يؤدي دوران عضو المجال الى توليد جهد متردد في لفائف المنتج يكون تردده مساويا" لسرعه العضو الدوار والى ذلك تعود تسمية الآلات التزامنية. ومن الجدير بالذكر ان الجهد المتولد في لفائف المنتج يمر خلال دورة موجية كاملة كلما عبرها زوج من اقطاب عضو المجال وهو بذلك يمر بعدد من الدورات الموجية يساوي عدد ازواج اقطاب المجال (pole pairs) لكل دورة ميكانيكية.

وقد يكون عضو المجال الدوار ذو اقطاب بارزة (salient poles) ذات لفائف مركزة او يكون اسطواني (cylindrical) ذو لفائف موزعة في زوج واحد من الاقطاب في العادة. ويعود الاختيار بين العضو الدوار ذو الاقطاب البارزة والعضو الدوار الاسطواني الى تردد التيار وسرعة المحرك الاولي والاعتبارات الميكانيكية عند التشغيل. ومن اشهر الآلات التزامنية المستخدمة في الحياة العملية المولدات التزامنية المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية الضخمة في محطات القوى.

3- الآلات الحثية: وهي آلات تيار متردد يتم فيها وضع اللفائف الرئيسية في العضو الساكن لتقوم بوظيفة المنتج اضافة الى احتثات ق.د.ك لفائف المجال في العضو الدورا والتي عادة ما تكون مغلقة ليس لها اي اتصال خارجي. ويؤدي تدفق التيار المتردد في لفائف العضو الساكن الى انشاء مجال مغناطيسي في الثغرة الهوائية يدور بسرعه التزامن. وكذلك تحمل لفائف العضو الدوار تيار متردد تدفعه ق.د.ك المحتثة فيها بواسطة المجال الدوار للفائف العضو الساكن كما في المحولات، والى ذلك تعود تسمية الآلات الحثية حيث يؤدي التفاعل بين مجال العضو الساكن وتيار العضو الدوار الى انتاج عزم المحرك.

وتقل سرعة دوران العضو الدوار عن سرعة التزامن بنسبة تسمى بمعامل الانزلاق (slip) ويكون تردد تيار لفائف المنتج اقل من تردد تيار العضو الساكن حيث يساوي الاول حاصل ضرب الاخير في معامل الانزلاق. وتعد المحركات الحثية من اكثر الآلات الكهربائية انتشارا" حيث غالبا" ما تكون لفائف العضو الدوار عبارة عن قضبان مقصورة عند اطرافها بحلقات طرفية فيما يسمى بالعضو الدوار ذو القفص السنجابي (squirrel-cage rotor). واحيانا" يكون العضو الدوار ذو لفائف عادية متعددة الاطوار فيما يعرف بالعضو الدوار ذو النوع الملفوف (wound rotor).

3.4 - بنية آلات التيار المستمر.

يبين الشكل (2) المعالم الاساسية لبنية (structure) آلة التيار المستمر بعضويها الساكن والدوار واللفائف الملحقة بكل منهما. ويسمى العضو الساكن لآلة التيار المستمر بالمقرن (yoke) او الاطار (frame) او عضو المجال. وهو يصنع على شكل اسطوانة ذات جدار مصمت من مادة فيرومغناطيسية (ferromagntic material) للحصول على الفيض المطلوب من ال ق.د.م للفائف المجال المثبتة بالجدار الداخلي للاطار والتي يتم اثارتها (excitation) مباشرة بالتيار المستمر لانتاج الفيض. وبالاضافة الى ذلك يوفر استخدام المادة الفيرومغناطيسية الخواص الميكانيكية المطلوبة في هيكل الآلة مع الحد من حجم الآلة.

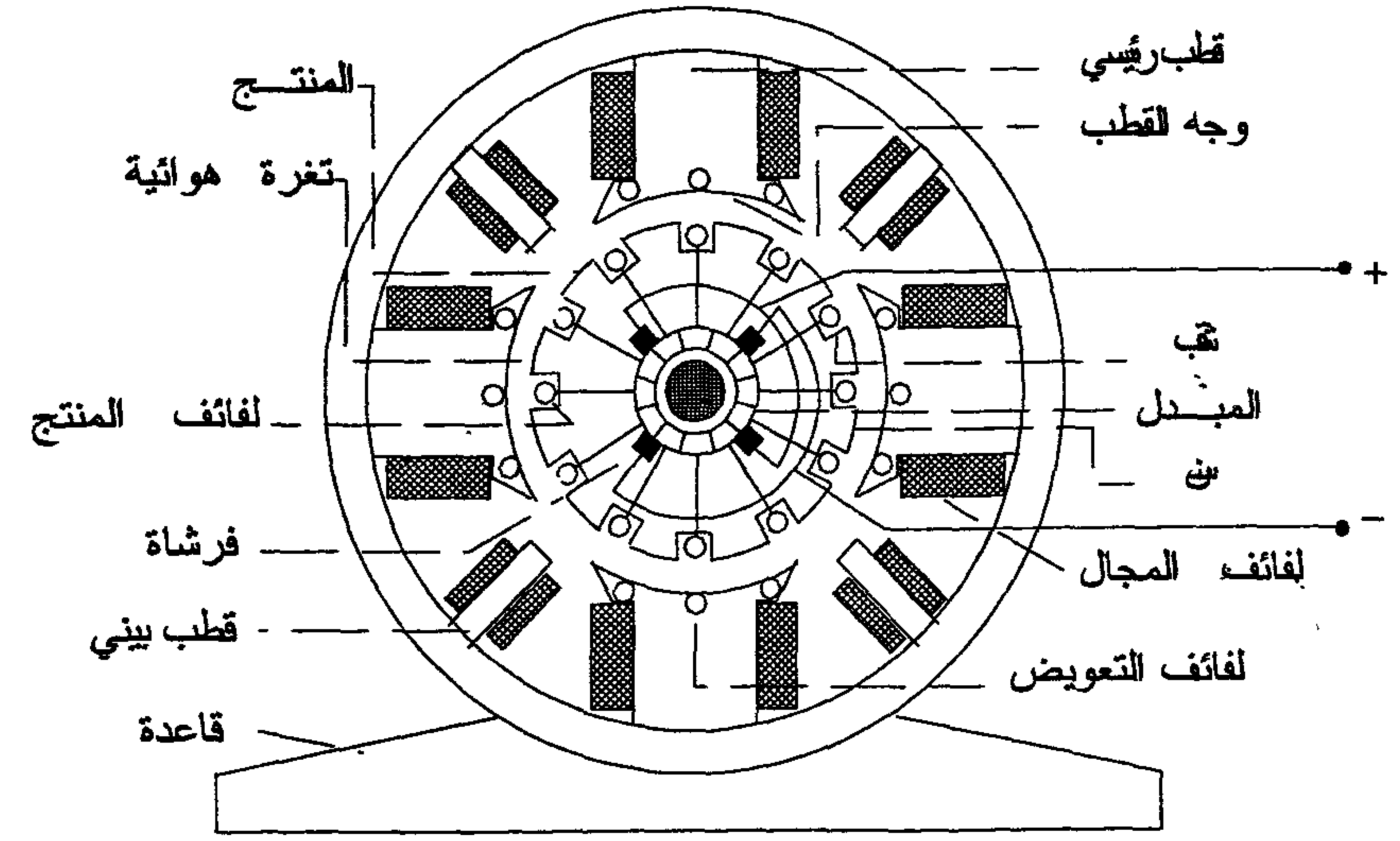
وعادة ماتتكون لفائف المجال المثبتة بالاطار من واحدة او اثنتين من اللفائف تعرف بلفائف مجال التوازي (shunt field) ولفائف مجال التوالي (series field) وهي تلف معا" حول اقطاب بارزة تسمى باقطاب المجال الرئيسية (main field poles). ويتم تثبيت الاقطاب بواسطة مسامير بالمحيط الداخلي للاطار الانبوبي والذي يحمل كذلك مجموعة الفرش (brush gear) ويثبت به كرسي التحميل (bearing) لعمود ادرة (shaft)

العضو الدوار ويزود بقاعدة (base) تقوم عليها الآلة. وهكذا يتضح من الشكل (2) ان الاطار يكمل الدائرة المغناطيسية للآلة والمتكونة من الاقطاب والثغرة الهوائية الاسطوانية (التي تفصل بين العضوين) والعضو الدوار ويوفر مسار (paths) عودة الفيض المغناطيسي بين اقطاب المجال.

ويصنع لب اقطاب المجال الرئيسية من صفائح (laminations) الصلب ذات الخواص المغناطيسية الجيدة حيث عادة ما تكون مساحة مقطع القطب صغيرة فيما عدا وجه القطب (pole face) المواجه للعضو الدوار والذي يكون اكبر مساحة لكي تستند عليه لفائف المجال ويسمح للفيض بتغطية مساحة اوسع من العضو الدوار. وبالاضافة الى الاقطاب الرئيسية يثبت في اطار الآلات الكبيرة وبالتحديد في منتصف المسافة بين الاقطاب الرئيسية اقطاب صغيرة تعرف باقطاب التبديل (compoles) او الاقطاب البينية (interpoles) والتي تسهل من عملية تبديل تيار المنتج. وكذلك تحتوي اقطاب مجال الآلات الضخمة على لفائف خاصة تسمى بلفائف التعويض (compensating winding) توضع طوليا في وجه القطب. وتستخدم لفائف التعويض للقضاء على الشرر الناتج عن عملية التبديل في حالات التيارات الضخمة والحالات العابرة.

وفي المقابل يصنع العضو الدوار الذي يسمى بالمنتج على شكل اسطوانة مصمته من حزمة من صفائح الصلب المعزولة ذات الخواص المغناطيسية الممتازة للحد من فقد التيار الدوامي الناتج عن المجال المغناطيسي المتردد الناشئ عن تيار موصلات المنتج. ويحتوي المحيط الخارجي للعضو الدوار على شقوب او مجاري (slots) محورية توضع فيها موصلات لفائف الانتاج (المنتج) لحمايتها ميكانيكيا" ولتقليل الثغرة الهوائية (air gap) بين العضوين. وتلحم اطراف لفائف المنتج بقطع المبدل (commutator segments) المعزولة بالميكا والتي تصنع من نحاس مقسى وتثبت على عمود الادارة.

وتنقل الفرش الكربونية (carbon brushes) الملامسة لقطع المبدل التيار من والى لفائف المنتج حيث تحتوي مجموعة الفرش على لولب يضغط على الفرش لكي يكون التلامس منتظما بينها وبين قطع المبدل. ويعمل المبدل اساسا" كمقوم ميكانيكي دوار يمكن من تحويل الجهد المتردد المحتث في لفائف منتج المولد الى تيار مستمر والعزم المتردد المبدول على منتج المحرك الى عزم ثابت مستقر (steady). ومن الواضح ان ق.د.ك او العزم الناتجين عن موصل واحد في المولد او المحرك لاتكفي للاغراض العملية ومن تم يجب ان يحتوي منتج الالة على الكثير من الموصلات لكي يكون آدائه فعالا.



شكل (2) بنية آلة التيار المستمر.

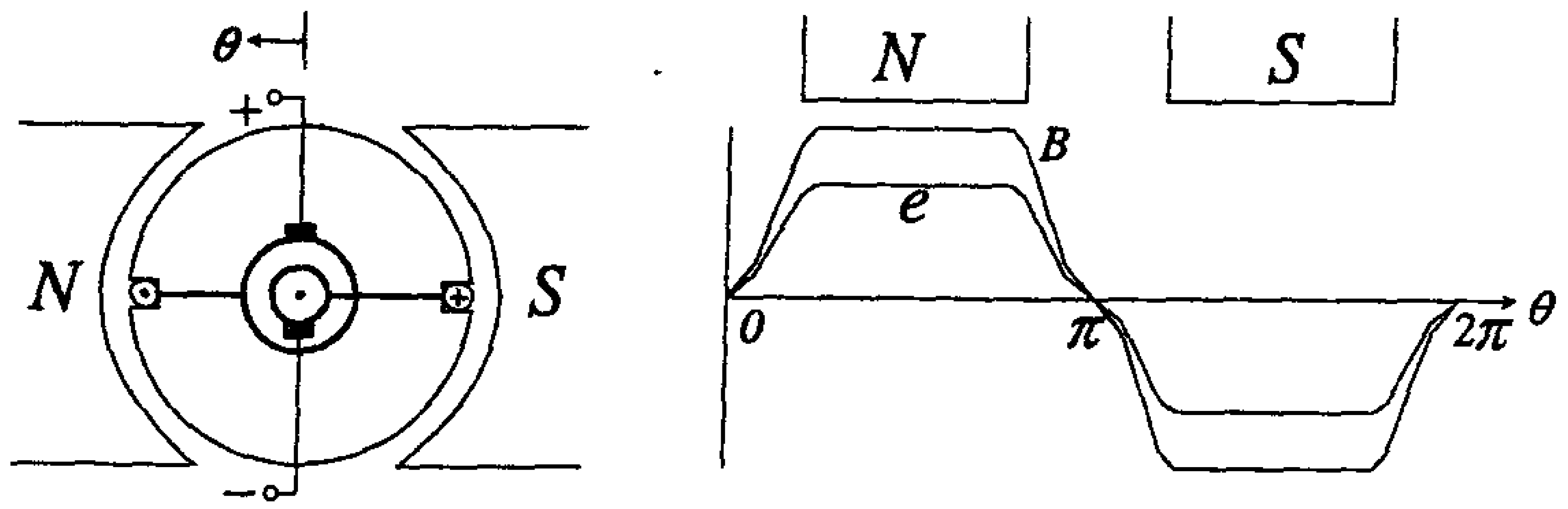
4.4 مبادئ عمل آلات التيار المستمر.

تقوم نظرية عمل المولدات الكهربائية اساسا" على ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي حيث تحثت ق.د.ك في موصلات المنتج نتيجة لوجود حركة نسبية بينها وبين فيض عضو المجال الذي يشبكها، وتحدد قاعدة

اليـد اليمنـى لفليمـنج اتجـاه ق.د.ك المحتثـة في موصـل يقطـع خطـوط فـيض مغناطيسـي عموديـا عليـه. واذا كانـت كثافـة الفـيض المغناطيسـي B وطـول الموصل l والسـرعة الـتي يقطـع بهـا المجـال عموديـا" v يمكـن مـن اساسـيات الكهرومغناطيسية التعبير عن مقدار ق.د.ك e المتولدة في الموصل كما يلي:

$$e = Blv \tag{4.1}$$

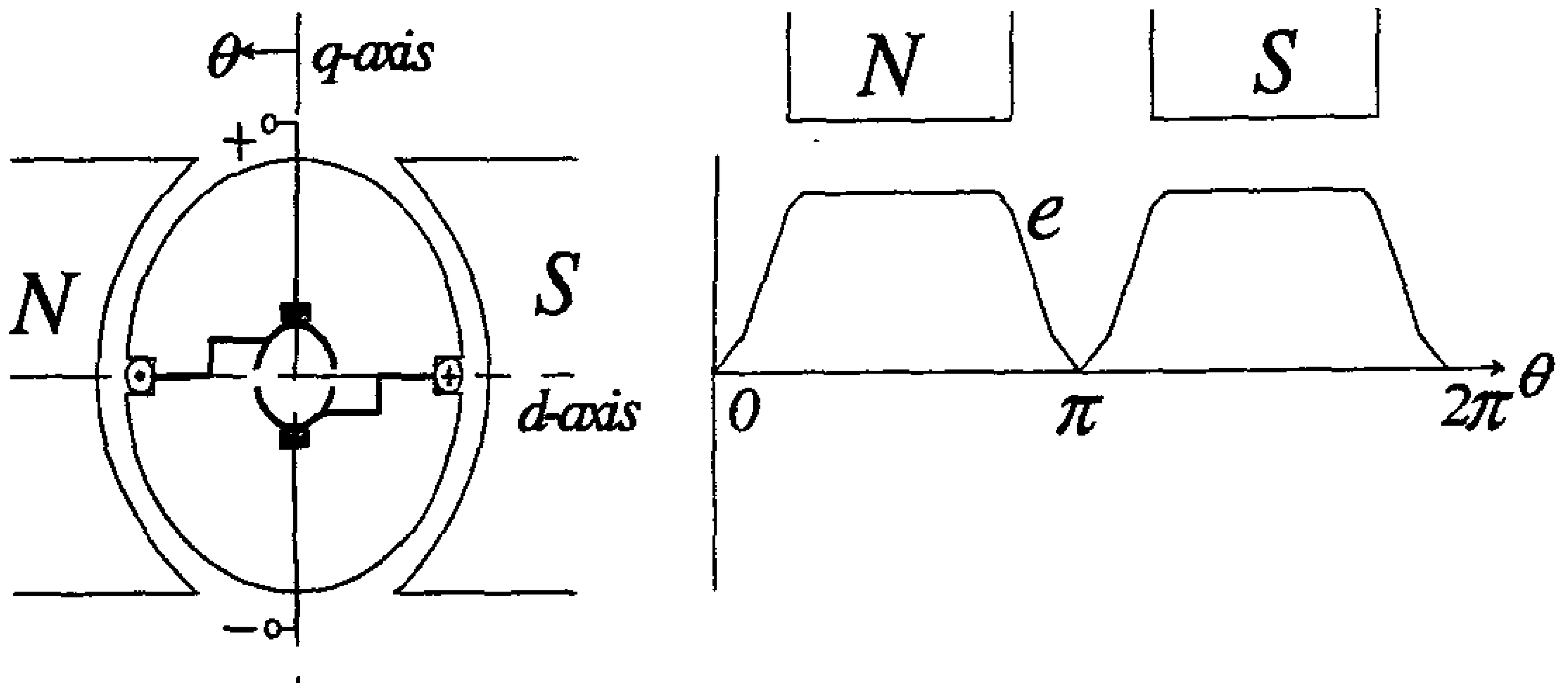
وبـالنظر الى مولـد بـدائي ثنـائي الاقطـاب يضـم منتجـه ملـف ذو لفـة واحـدة تنتهـي اطرافـه بحلقتـان زلاقتـان (sliding rings) تتصـلان بفـولتمتر عـن طريـق فرشـاتين تلامسـاهما بانتظـام كمـا في الشـكل (3). وعنـد دوران الملف ستحث في كل من ضلعيه وطبقـا" للمعادلـة (4.1) ق.د.ك تكونـا علـى التـوالي وتكـون ق.د.ك الملـف (الـتي تظهـر بـين الفرشـاتين) عبـارة عـن مجموعهما. ونظرا" لان الضلعان يتبادلان موقعهما تحت القطبين بالتناوب فإن ق.د.ك بـين الفرشـاتين سـتكون ذات طبيعـة ترددية تشـبه في شـكلها الموجي منحنـى توزيـع الفـيض شـبه الجيبي (sinusoidal) في التغـرة الهوائيـة للآلـة وكما هو مبين في الشكل (3).



شكل (3) ق.د.ك آلة تيار مستمر بدائية بدون مبدل

وعند استبدال الحلقتان بحلقـة واحـدة مقسـومة الى نصـفين معـزولين لتمثل مبـدل ذو قطعتين، يتضـح عنـد دوران المنـتج في اتجـاه محـدد ان احـدى الفرشـاتين سـتكون باسـتمرار ملامسـة للقطعـة (نهايـة الملـف) الموجبـة بينمـا تكون الاخرى ملامسة للقطعة السـالبة. وهكـذا يقـوم المبدل في مولـد التيـار المستمر بتحويل ق.د.ك لفائف المنتج المترددة الى ق.د.ك احادية الاتجاه كما في

الشكل (4). ومن الجدير بالذكر ان منتج الآلة الحقيقية يحتوي على عدد كبير من الملفات وهو ما يقلل من التموج في ق.د.ك المنتج ويمكن من الحصول على جهد مستمر عالي الجودة (اي ذو تموجات صغيرة جدا").



شكل (4) تبديل الجهد في آلة تيار مستمر بدائية

وفي المقابل تقوم نظرية عمل المحركات الكهربائية اساسا" على ظاهرة القوى الكهرومغناطيسية حيث تتعرض موصلات المنتج الحاملة للتيار الى قوى تؤثر عليها في اتجاه ما نتيجة لوجودها في الفيض المغناطيسي لعضو المجال، وتحدد قاعدة اليد اليسرى اتجاه القوة الميكانيكية المؤثرة على موصل يحمل تيارا ويشبكه مجال مغناطيسي عمويا" عليه. واذا كانت كثافة الفيض المغناطيسي B وكان تيار الموصل i وطوله l يمكن التعبير عن القوة F المؤثرة على الموصل كما يلي:

$$F = Bli \qquad (4.2)$$

وعند تغذية منتج الآلة ذات الحلقتين الزلاقتين المبينة في الشكل (3) بتيار مستمر بغية تشغيلها كمحرك سيتضح ان الموصل سيتعرض طبقا" للمعادلة (4.2) الى قوة مماسية تشده في اتجاه ما عند وجوده تحت قطب شمالي والى قوة تشده في الاتجاه المعاكس عند وجوده تحت قطب جنوبي (لاحظ ثبوت اتجاه التيار في الموصل). وتبعا" لذلك يكون العزم $(T=F.r)$ المبدول على ملف المنتج متردد وقيمته المتوسطة صفر. وكما في المولد يمكن انتاج عزم مستمر بجعل تيار ملفات المنتج مترددا" بواسطة المبدل الذي يحول

التيار المستمر الداخل عن طريق الفرش الى تيار متردد في لفائف المنتج كما في الشكل (4).

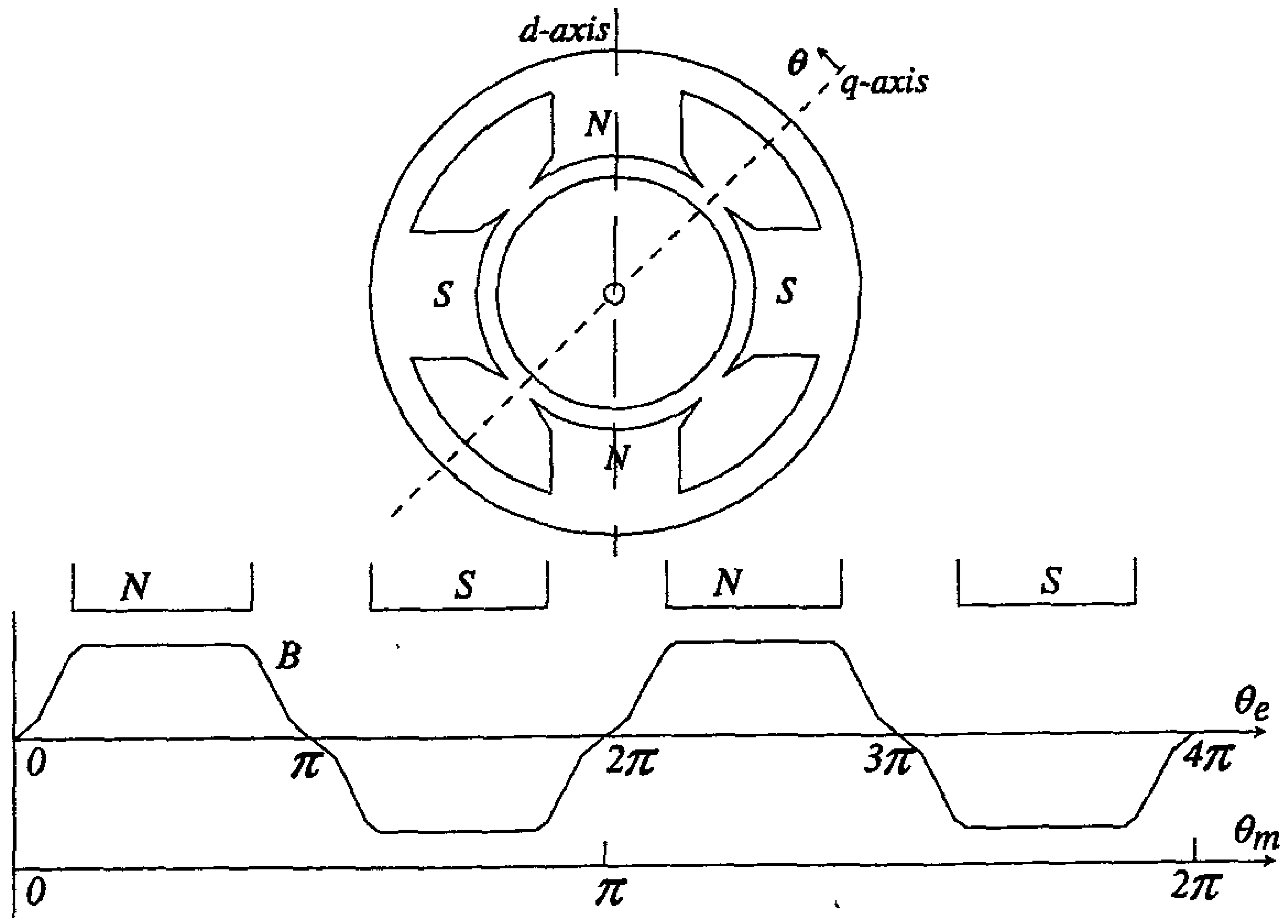
ويتضح من الشكل (4) ان اتجاه فيض (اقطاب) المجال ينطبق على المحور الواصل بين مركزي القطبين المتجاورين حيث يسمى هذا المحور بمحور المجال او المحور المباشر d-axis (direct-axis). كما يتضح من ذات الشكل ان الفرش ستقوم بقصر الملف لحظة وجود ضلعيه على المحور الفاصل (في منتصف المسافة) بين القطبين المتجاوين والذي يعرف بالمحور المتعامد q-axis (quadrature-axis). وقد اصطلح على التعبير عن هذه الحقيقة بالنظر الى محور الفرش على انه ينطبق على المحور المتعامد للآلة وان لم يكن الموضع الفيزيائي الفعلي للفرش كذلك. كما يتبين من الشكل (4) ان اتجاه التيار في الملف سينقلب اتجاهه بعد انتهاء قصره لحظة عبوره للمحور المتعامد ليتم ذلك لحظة عدم وجود ق.د.ك به لكونه يتحرك موازيا" لخطوط الفيض وليس عموديا" عليها.

وبالنظر الى منتج متعدد اللفات كما هو الحال في الواقع يتبين وفقا" لما سبق ان تيارات الموصلات المقابلة لقطب ما ستكون جميعها في نفس الاتجاه بينما تكون تيارات الموصلات المقابلة للقطب المجاور جميعا" في الاتجاه المعاكس. ونتيجة لذلك سيؤدي تدفق التيار في لفائف المنتج الى انتاج فيض مستمر ينطبق محوره على المحور المتعامد للآلة وهو ما يجعل فيض المنتج متعامدا" مع فيض المجال. وفي الواقع سيؤدي هذا التعامد الى انتاج اكبر عزم ممكن في الآلة نظرا" لأن تيار الموصلات سيكون اكبر مايمكن لحظة عبورها لمنطقة اعلى كثافة للفيض على المحور المباشر كما يتضح من المعادلة (4.2).

وفي الحياة العملية كثيرا" ما يكون عدد اقطاب آلة التيار المستمر اكثر من اثنين لكي يكون موصل المنتج في منطقة كثافة فيض عالية

(تحت الاقطاب) لاطول فترة ممكنة اثناء دوران المنتج. ويبين الشكل (5) مخطط مولد بدائي ذو اربعة اقطاب ومنحنى توزيع كثافة الفيض خلال الثغرة الهوائية للآلة حيث يتضح انه باتمام دورة (ميكانيكية) كاملة حول المنتج سيكمل منحنى توزيع كثافة الفيض خلال الثغرة موجتين او دورتين (كهربائيتين) كاملتين. وبهذا يكون عدد الدورات الكهربائية مساو لعدد الدورات الميكانيكية مضروبا" في عدد ازواج الاقطاب p. وبصفة عامة يتضح ان العلاقة بين الزاوية الميكانيكية θ_m مقاسة بالدرجات عبر الفضاء والزاوية الكهربائية θ_e مقاسة بالدرجات عبر الدورة الكهربائية تعطى بالمعادلة التالية:

$$\theta_e = p\theta_m \qquad (4.3)$$

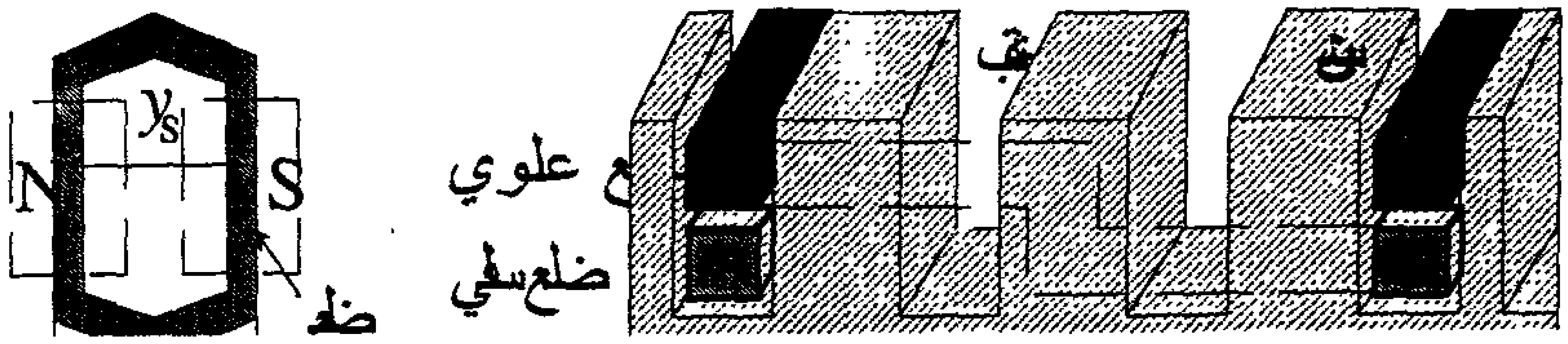


شكل (5) توزيع كثافة الفيض لآلة 4- اقطاب

5.4 لفائف المنتج.

ان انتاج جهد او عزم كافي للاغراض العملية يتطلب عدد كبير من موصلات لفائف المنتج التي تصنع في هيئة ملفات. ويبلغ عدد لفات الملف نصف موصلاته كما يضم ضلع الملف نصف هذه الموصلات. وتوزع الملفات على الشقوب بحيث يقع ضلعي الملف تحت تأثير قطبين متعاكسين وتوصل الملفات مع بعضها البعض بطريقة مناسبة في دوائر توالي/توازي. وتسمى لفائف آلات التيار المستمر بالفائف المغلقة (closed winding) ولفائف آلات التيار المتردد ذات الحلقات الزلاقة (slip-rings) باللفائف المفتوحة (open winding). وفي آلة التيار المستمر عادة ما تكون اللفائف ثنائية الطبقة حيث يقسم الشقب الى طبقتين تضم كل منها ضلع ملف او اكثر كما في الشكل (6). واذا كان عدد ملفات المنتج C وعدد لفات كل ملف n وعدد شقوب المنتج S وعدد اضلع الملفات لكل شقب u، يمكن ببساطة اثبات ان عدد موصلات المنتج Z سيكون $Z = 2Cn = uSn$.

وتلتقي عند كل قطعة مبدل نهاية احد الملفات وبداية ملف آخر مما يجعل عدد قطع المبدل مساويا" لعدد الملفات C. وتعرف المسافة بين ضلعي الملف بباع الملف (coil span) y_S وهي تقاس بعدد شقوب المنتج المحصورة بين ضلعي الملف الواحد. وفي آلات التيار المستمر عادة ما يكون باع الملف مساويا" لخطوة القطب (pole pitch) y_p اي المسافة بين مركزي قطبين (مختلفين القطبية) متجاورين ويعرف الملف في هذه الحالة بانه ذو خطوة كاملة (full pitch). اما اذا كان باع الملف اقل من خطوة القطب كما هو الحال في آلات التيار المتردد في الغالب فإن الملف يعرف بانه ذو خطوة قصيرة (short pitch). ومن الجذير بالذكر ان باع الملف يكون دائما" عدد صحيح يساوي خطوة القطب او اقرب عدد صحيح اصغر منها.

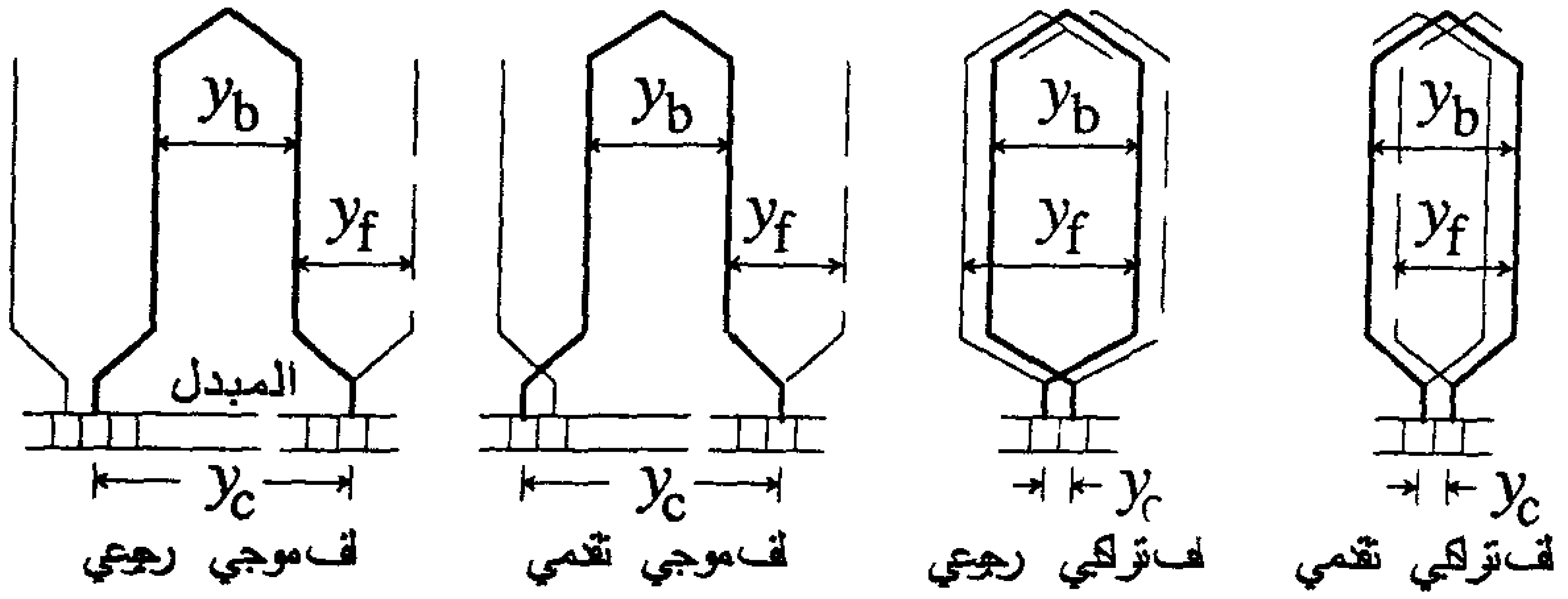


شكل (6) ترتيب وضع ملفات المنتج.

وتعرف المسافة المحصورة بين الاضلع المتصلة مباشرة بخطوة الملف (coil pitch) التي تقاس بعدد اضلع الملفات. ويقع تحت هذا التعريف الخطوة الخلفية (back pitch) y_b وهي المسافة بين ضلعي الملف (المتصلين من خلف الآلة) والتي تساوي باع الملف الذي يقاس بعدد الشقوب، والخطوة الامامية (front pitch) y_f وهي المسافة بين الضلع الاخير للملف والضلع الاول للملف الذي يليه في اتجاه اللف (والمتصلين من امام الآلة حيث يوجد المبدل). كما تعرف المسافة بين قطعتي المبدل المتصلة بهما طرفي الملف بخطوة المبدل (commutator pitch) y_C والتي تقاس بعدد قطع المبدل حيث تعتمد العلاقة بينها وبين خطوة القطب على نوع اللفائف. وهناك نوعان اساسيان للفائف المنتج هما اللفائف المتراكبة (lap windings) واللفائف الموجية (wave windings). وهما يختلفان في كيفية اتصال طرفي ملفاتهما بقطع المبدل حيث يتصل ملف اللفائف المتراكبة البسيطة (symplex) بقطعتي مبدل متجاورتين بينما يتصل ملف اللفائف الموجية البسيطة بقطعتين تفصلهما مسافة خطوتي قطب.

وعادة ما تكون لفائف منتج الآلات ثنائية الاقطاب متراكبة بينما تكون لفائف الآلات رباعية الاقطاب ذات الجهد العالي موجية. ويمكن للفائف المنتج ان تكون تقدمية (progressive) او رجوعية (retrogressive) بحسب موضع قطع المبدل الموصل بها اطراف اللفائف. ففي اللف المتراكب البسيط يكون اللف تقدمي اذا كانت نهاية الملف موصلة بقطعة تلي قطعة البدايه (اي على يمينها عند النظر من امام المنتج)،

بينما يكون اللف رجوعي اذا كانت قطعة النهاية سابقة لقطعة البداية. اما في اللف الموجي البسيط فينظر الى دائرة الملفات المتوالية بعد مرورها حول المنتج حيث يتم توصيل نهاية آخر ملف بقطعة مبدل تلي قطعة البداية في اللف التقدمي وبالقطعة السابقة لقطعة البداية في اللف الرجوعي. ويبين الشكل (7) انواع اللفائف السابقة وكل من باع الملف وخطوات اللفائف التي تم تعريفها لتوصيف اللفائف بالكامل.



شكل (7) انواع لفائف المنتج.

1.5.4 اللفائف المتراكبة البسيطة.

يتم في اللفائف المتراكبة البسيطة توصيل نهاية الملف الاول بقطعة مبدل مجاورة لقطعة البدايه وتوصل بداية الملف التالي بنفس قطعة نهاية الملف السابق الى ان توصل نهاية آخر ملف ببداية الملف الاول لتكون الملفات دائرة توالي مغلقة. وتوضع الفرش التي يبلغ عددها عدد اقطاب الآلة على مسافات متساوية على سطح المبدل ويحدد موضعها لتقصر الفرشاة الملف (اي قطعتي المبدل المتصل بهما) لحظة وجود ضلعيه على الخط الفاصل بين الاقطاب. وتوصل الفرش الموجبة معا" والفرش السالبة معا" لتكوين الطرفين الموجب والسالب للآلة. وبذلك تكون خطوة المبدل في اللفائف المتراكبة البسيطة $y_c=\pm1$ وتكون الخطوتين الخلفية y_b والامامية y_f اعداد فردية مساوية تقريبا" لخطوة القطب بحيث تكون $y_b>y_f$ في اللف التقدمي حيث يكون

اللف في اتجاه اليمين وتكون $y_b<y_f$ في اللف الرجوعي حيث يكون اللف في اتجاه اليسار. واذا كان عدد ازواج الاقطاب p وعدد الشقوب S وعدد الملفات C يكون باع الملف $y_S=S/2p$ ويمكن التعبير عن خصائص اللف المتراكب التقدمي البسيط كما يلي:

$$y_C = +1, \quad y_b = C/p + 1, \quad y_f = C/p - 1 \tag{4.4}$$

وفي المقابل يمكن التعبير عن العلاقات التي تصف اللف المتراكب الرجوعي البسيط كما يلي:

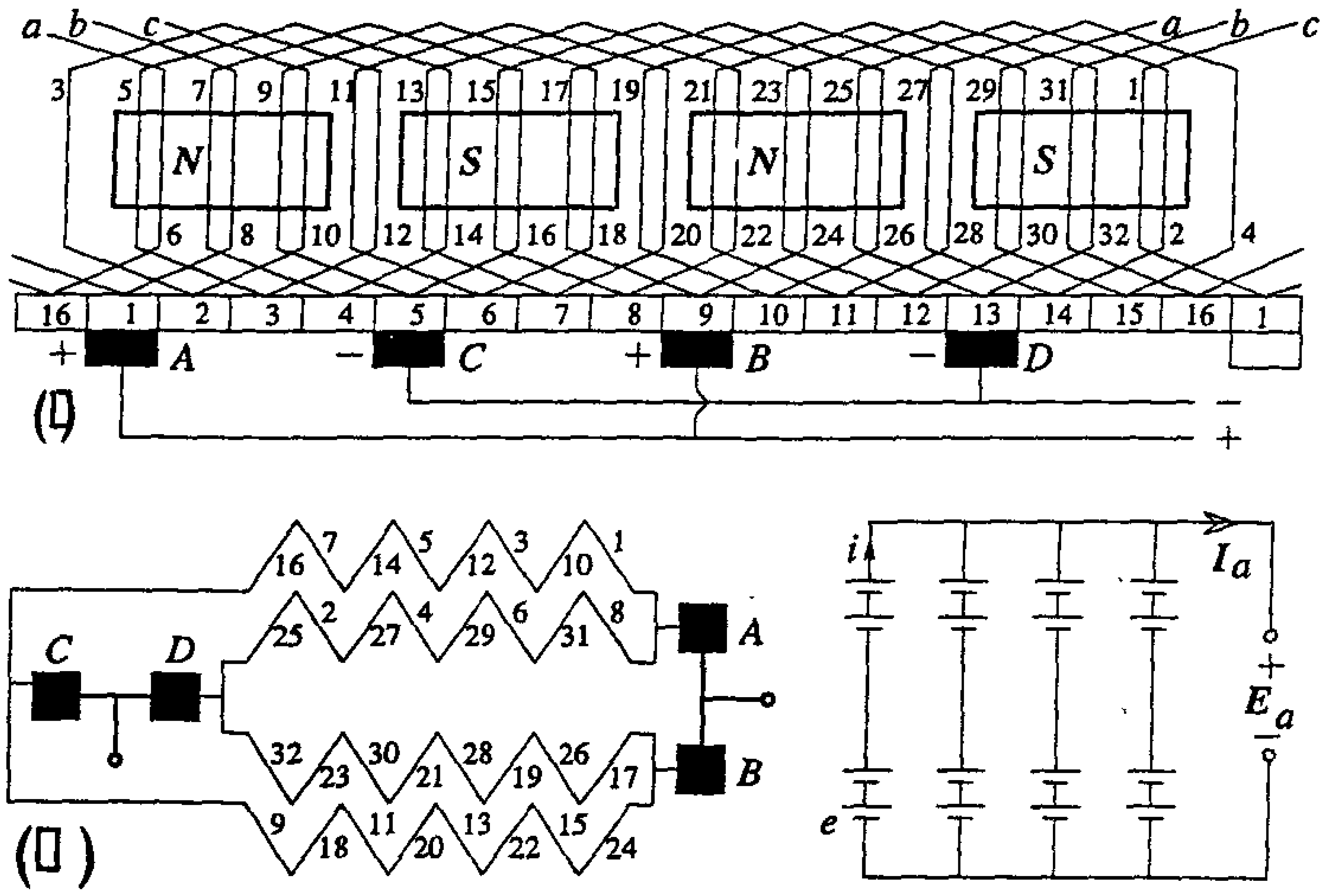
$$y_C = -1, \quad y_b = C/p - 1, \quad y_f = C/p + 1 \tag{4.5}$$

ولدراسة خصائص اللف يمكن استخدام المخطط المنبسط (developed diagram) والناتج من تصور ان سطح المنتج قد تم بسطه ليصبح مستويا". وكمثال يبين الشكل (8) مخطط منبسط لمنتج آلة ذات 4 اقطاب 16 شقب تحمل 16 ملف مزدوجة الطبقة ذات لف تراكبي تقدمي بسيط. ويتضح من المعادلة (4) ان خصائص اللف هي: $y_C = 1,\ y_S = 4,$ $y_b = 9,\ y_f = 7$. ويتضح من الشكل (8) ان اللفائف تنقسم بالتساوي الى عدد من المسارات المتوازية a يمتد كل منها بين فرشاتين موجبة وسالبة مما يجعل عدد المسارات يساوي عدد الاقطاب وعدد الملفات المتصلة على التوالي في المسار يساوي عدد الملفات لكل قطب. وهكذا تكون ق.د.ك الكلية للمنتج E_a (بين الفرش الموجبة والسالبة) مساوية لـ ق.د.ك المتولدة في اي من المسارات المتوازية، كما يكون التيار الكلي للمنتج I_a مجموع التيارت (المتساوية) المتدفقة في المسارات المتوازية. وبصفة عامة اذا كان متوسط ق.د.ك المتولدة في كل موصل e والتيار المتدفق في كل موصل i يمكن التعبير عن ق.د.ك وتيار المنتج كما يلي:

$$a = 2p \tag{4.6}$$

$$I_a = ai = 2pi \tag{4.7}$$

$$E_a = e(Z/a) = e(Z/2p) \quad (4.8)$$



شكل (8) مخططات اللفائف المتراكبة

2.5.4 اللفائف الموجية البسيطة.

يتم في اللفائف الموجية البسيطة توصيل نهاية الملف الاول بقطعة مبدل تفصلها عن قطعة البداية مسافة خطوتي قطب تقريبا" وتوصل بداية الملف التالي بنفس قطعة نهاية الملف السابق الى ان تتم دورة حول المنتج حيث توصل نهاية الملف الاخير بقطعة مجاورة لبداية الملف الاول ويستمر اللف على هذا النمط حتى تنتهي اللفائف. ويكون اللف تقدمي عند توصيل نهاية آخر ملف بعد اتمام الدورة بالقطعة التي تلي بداية الملف الاول، ويكون رجوعي عند توصيل نهاية آخر ملف بالقطعة السابقة للبداية. وترتب الفرش ويحدد موضعها بشكل مماثل للف التراكبي ولكن لايشترط ان يكون عددها مساويا" لعدد الاقطاب بل يمكن الاكتفاء باثنتين كما سيتضح لاحقا". ويتبين من طريقة اللف المتبعة في هذه الحالة ان عدد الملفات وعدد الشقوب لايمكن ان يكون مضاعفا" صحيحا" لعدد ازواج الاقطاب. وبذلك يمكن

بصفة عامة التعبير عن خصائص اللف الموجي البسيط كما يلي:

$$y_s \sim S/2p\ , \quad y_c = 2(C\pm1)/p\ , \quad y_b + y_f = 2(C\pm1)/p \qquad (4.9)$$

حيث تكون الاشارة $\pm$ موجبة للف التقدمي و سالبة للف الرجوعي.
وكما في اللفائف المتراكبة يجب ان تكون الخطوتين الخلفية والامامية اعداد فردية مساوية تقريبا" لخطوة القطب. وبذلك يمكن التعبير عن قيمتهما من العلاقات التالية:

$$(C\pm1)/p = \text{عدد فردي} \Rightarrow y_b = y_f = (C\pm1)/p \qquad (4.10)$$

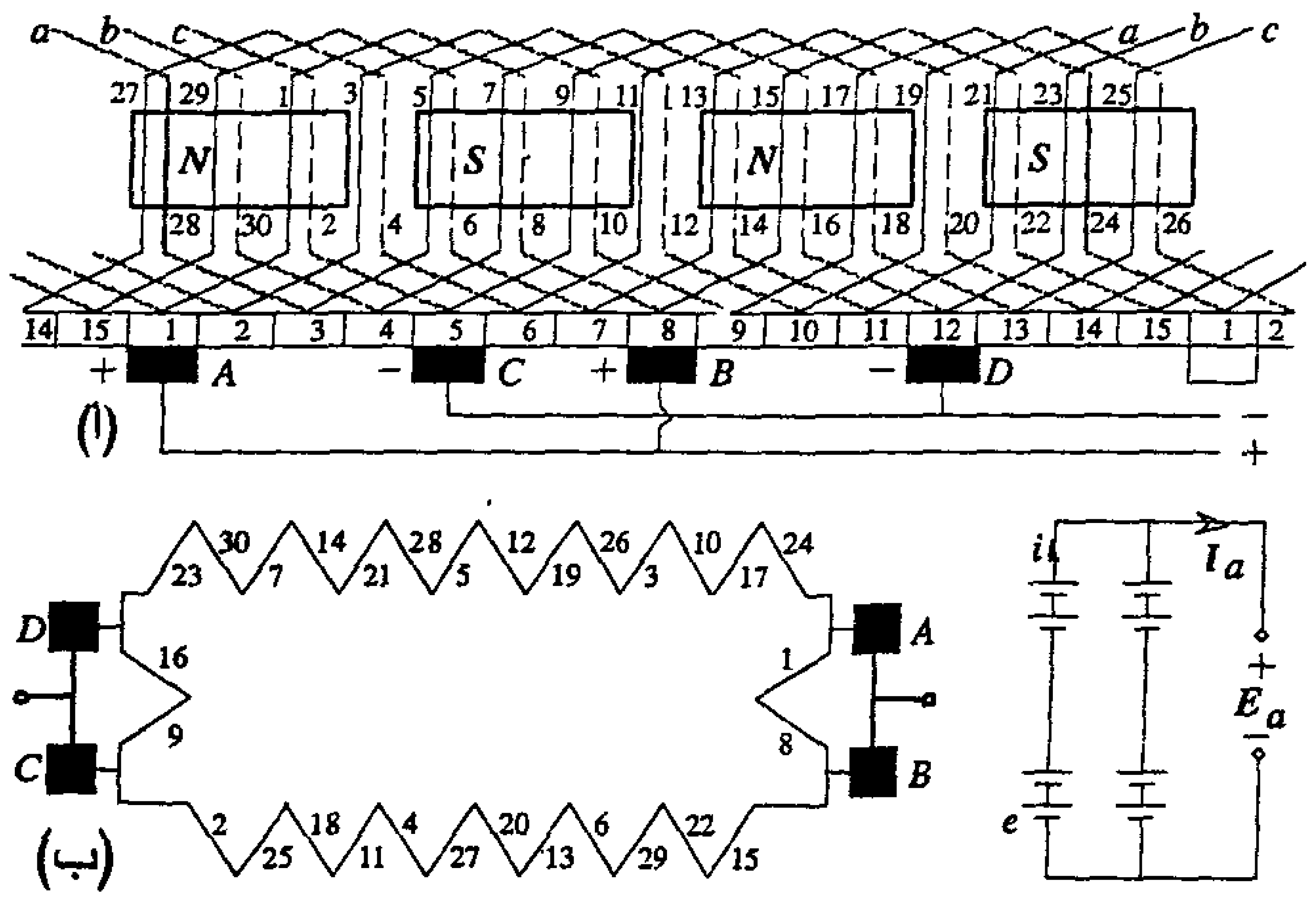
$$(C\pm1)/p = \text{عدد زوجي} \Rightarrow y_b = y_f + 2 = (C\pm1)/p + 1 \qquad (4.11)$$

وكمثال لدراسة خصائص اللف الموجي الرجوعي البسيط يبين الشكل (9) مخطط منبسط لمنتج آلة ذات 4 اقطاب 15 شقب تحمل 15 ملف مزدوجة الطبقة. ومن المعادلة (4.10) تكون خصائص اللف هي: $y_c = 4,\ y_b = y_f = 7,\ y_s \approx 7$. ويتضح من الشكل (9) ان اللفائف تتقسم الى مسارين متوازيين باستمرار وبغض النظر عن عدد الفرش حيث ان العدد الضروري للفرش هو اثنان ولكن يمكن استخدام عدد مساو لعدد الاقطاب. وهكذا تكون ق.د.ك الكلية للمنتج E_a مساوية لـ ق.د.ك المتولدة في اي من المسارين المتوازية، كما يكون التيار الكلي للمنتج I_a مجموع التيارت المتدفقة في المسارين. وبصفة عامة اذا كان متوسط ق.د.ك المتولدة في كل موصل e والتيار المتدفق في كل موصل i يمكن التعبير عن ق.د.ك وتيار المنتج كما يلي:

$$a = 2 \qquad (4.12)$$

$$I_a = ai = 2i \qquad (4.13)$$

$$E_a = e(Z/a) = e(Z/2) \qquad (4.14)$$



شكل (9) مخططات اللفائف الموجية.

6.4 ق.د.ك وعزم المنتج.

يمكن التعبير عن ق.د.ك المحتثة في لفائف منتج آلة التيار المستمر انطلاقاً" من ق.د.ك المحتثة في الموصل الواحد طبقاً" للمعادلة (4.1) حيث يمكن من الشكل (4) الحصول على متوسط كثافة الفيض الذي يقطعه الموصل بقسمة الفيض الكلي Φ_t خلال التغرة الهوائية الفاصلة بين العضوين على المساحة الاسطوانية لسطح المنتج. واذا كان نصف قطر المنتج r ومساحة سطحه A وكان الفيض الناتج عن كل قطب Φ وعدد ازواج الاقطاب p نجد ان:

$$B = \Phi_t/A = 2p\Phi/(2\pi rl) = p\Phi/\pi rl \qquad (4.15)$$

واذا كانت سرعة دوران المنتج ومن ثم الموصل N دورة/دقيقة او $N/60$دورة/ثانية نحصل على السرعة الخطية المماسية v_t التي يقطع بها الموصل الفيض كما يلي (لاحظ ان الموصل يتحرك مسافة تساوي محيط المنتج أي $2\pi rl$ في كل دورة):

$$v_t = 2\pi rlN/60 \qquad (4.16)$$

ويمكن التعبير عن متوسط ق.د.ك الموصل بالتعويض عن B و v من المعادلتين (4.15) و (4.16) في المعادلة (4.1) كما يلي:

$$e = 2p\Phi N/60 \qquad (4.17)$$

واذا كان العدد الكلي لموصلات لفائف المنتج Z وكانت تلك الموصلات موصلة في مسارات متوازية عددها a نجد ان كل مسار يضم Z/a موصل متصلة على التوالي، حيث يكون عدد هذه المسارات مساو لعدد الاقطاب $2p$ للفائف المنتج المتراكبة البسيطة ويكون عددها 2 للفائف الموجية البسيطة. وعليه يمكن بصفة عامة التعويض من المعادلة (4.17) عن ق.د.ك e المتولدة في كل موصل للتعبير عن متوسط ق.د.ك المتولدة في المنتج E_a كما يلي:

$$E_a = eZ/a = 2p\Phi NZ/(60a) \qquad (4.18)$$

وفي المقابل يمكن التعبير عن العزم الدوراني (Torque) المبدول على لفائف منتج آلة التيار المستمر انطلاقا" من العزم T_C المبدول على الموصل الواحد (الذي يتحرك في مسار دائري على سطح منتج نصف قطره r) والذي يمكن طبقا" لمبادئ الديناميكا الحصول عليه من المعادلة (4.2) كما يلي:

$$T_C = F.r = Bilr \qquad (4.19)$$

وهنا كذلك يمكن الحصول على متوسط كثافة الفيض B الذي يشبك الموصل من المعادلة (4.15) حيث يمكن التعبير عن العزم المبدول على الموصل بالتعويض عن B من المعادلة (4.15) في المعادلة (4.19) كما يلي:

$$T_C\, p2 = \Phi i/2\pi \qquad (4.20)$$

وبصفة عامة اذا كان تيار المنتج I_a وعدد موصلاته Z موصل موصلة في مسارات متوازية عددها a يضم كل منها Z/a موصل على التوالي فأن التيار المتدفق في كل مسار (اي في كل موصل) يكون $i=I_a/a$. وبالتعويض

عن العزم الناتج على كل موصل من المعادلة (4.20) يمكن التعبير عن متوسط العزم الكلى الناتج على لفائف المنتج كما يلي:

$$T_a = T_c Z = 2p\Phi iZ/2\pi = 2p\Phi I_a Z/(2\pi a) \qquad (4.21)$$

وعادة ما يعبر في الحياة العملية عن ق.د.ك وعزم آلة التيار المستمر كما يلي (لاحظ ان السرعة الزاوية): $N/60\pi\omega_m=2$

$$E_a = K_a \Phi \omega_m \qquad (4.22)$$

$$T_a = K_a \Phi I_a \qquad (4.23)$$

$$K_a = pZ/\pi a \qquad (4.24)$$

ومن الجدير بالذكر ان معادلتي ق.د.ك والعزم السابقتين لايعتمدان على كون الآلة مولد ام محرك بل تنطبقان على الحالتين. وفي حالة تشغيل الآلة كمحرك يجب ان يكون صافي القدرة الكهربائية P_e الداخلة للمنتج مساوية للقدرة الميكانيكية (الكلية) P_m الخارجة من المنتج، مع ملاحظة ان العكس سيكون صحيحا" في حالة تشغيل الآلة كمولد. ويمكن اثبات ذلك ومن تم البرهنة على توازن الطاقة في الآلة كما يلي:

$$P_e = E_a I_a = K_a \Phi I_a \omega_m = T_a \omega_m = P_m \qquad (4.25)$$

7.4 رد فعل المنتج.

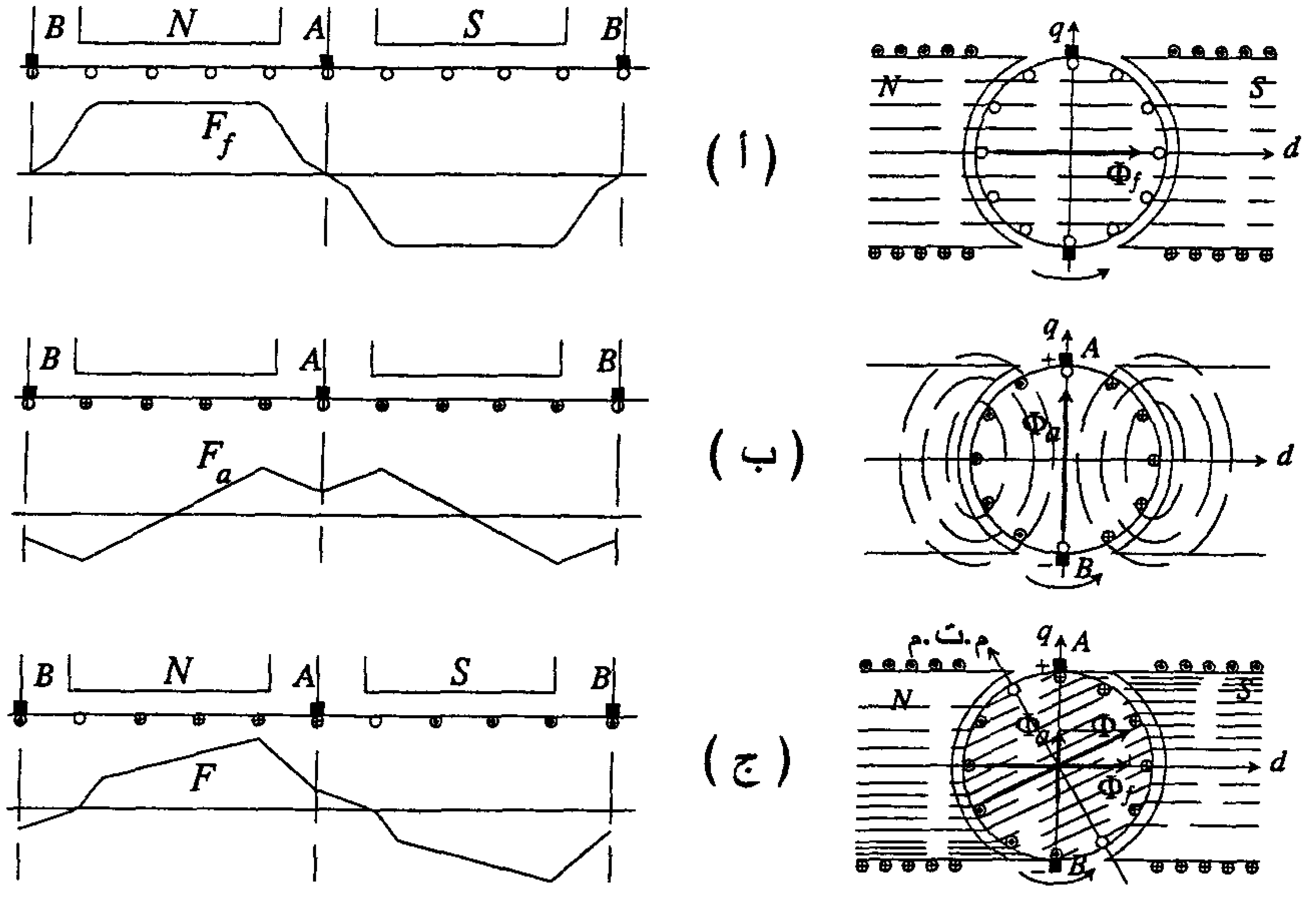
تبين فيما سبق ان اتجاه ق.د.ك وتيار موصلات المنتج المقابلة لقطب ما تكون عكس اتجاهها في الموصلات المقابلة لقطب معاكس. كما تبين ان محور الفرش ينطبق على المحور المتعامد للآلة حيث لاتقصر الفرش قطعتي المبدل الا حين يكون الملف المتصل بهما منطبقا" على ذلك المحور ولايوجد به ق.د.ك ولاتيار. ويشار احيانا" الى المحور المتعامد للآلة بمحور التعادل الهندسي (GNA) الذي يفصل بين القطبين الرئيسين في منتصف المسافة بينهما. ومن الجدير بالذكر ان محور التعادل المغناطيسي (MNA) للآلة سيكون

منطبقا" على محور التعادل الهندسي اثناء اللاحمل. ويعرف محور التعادل المغناطيسي (م.ت.م) للآلة بانه المحور العمودي على خطوط فيض التغرة الهوائية للآلة حيث ما كان اتجاها.

ويبين الشكل (10- أ) توزيع الفيض الناتج في التغرة الهوائية عن ق.د.م (mmf) لفائف المجال Ff لكل قطب لمولد بدائي اثناء اللاحمل (حين لايتدفق التيار في المنتج) حيث يتضح ان المتجه الطوري لفيض المجال Φf ينطبق على المحور المباشر d-axis ويكون عموديا" على المحور المتعامد q-axis للآلة. ويلاحظ عند تدفق التيار في لفائف المنتج (اثناء الحمل) ان المنتج يحاكي ملف لولبي ينشئ فيض مغناطيسي يتحدد اتجاهه طبقا" لاتجاه التيار في لفائفه بقاعدة الولب الايمن. وبذلك سينطبق متجه فيض المنتج تماما" على محور الفرش. واذا كان منتج المولد يدور ضد اتجاه عقارب الساعة فإن ق.د.م المنتج Fa تنتج فيض ينطبق متجهه الطوري Φa على محور الفرش المنطبق على المحور المتعامد كما هو مبين في الشكل (10- ب).

ويقصد برد فعل المنتج (armature reaction) تأثير ق.د.م المنتج على توزيع الفيض في التغرة الهوائية اثناء الحمل مقارنة بحالة اللاحمل حيث يبين الشكل (10- ج) محصلة وتوزيع الفيض الناتجة عن ذلك. وفي حالة المولد يؤدي ذلك الى تشوه توزيع الفيض في التغرة الهوائية باضعاف كثافة الفيض عند حافة القطب المتقدمة ودعمها عند الحافة اللاحقة (في اتجاه الدوران). ونتيجة لتأثير التشبع تكون نسبة الزيادة في كثافة الفيض عند الحافة اللاحقة اقل من نسبة النقصان فيها عند الحافة المتقدمة مما يؤدي الى خفض محصلة الفيض ومن ثم خفض ق.د.ك المنتج. كما يؤدي رد فعل المنتج الى ازاحة محور التعادل المغناطيسي (MNA) (العمودي على خطوط الفيض حيث يجب ان يكون محور الفرش) عن المحور المتعامد في اتجاه الدوران ليصبح عموديا" على متجه محصلة الفيض. وفي المحرك يكون الانحراف معاكس لاتجاه الدوران ويؤدي الى نقصان عزم المحرك.

وتعـود مضـار رد فعـل المنـتج اساسـا" الى انحـراف محـور التعـادل المغناطيسي حيث يؤدي ذلك الى رداءة التبديل عند بقاء الفرش على المحور المتعامد. ونظرا لان رد فعل المنتج يعتمد على الحمولة فإن التغيرات العابرة في الحمولة ستؤدي الى تغيير توزيع الفيض بمعدل سريع مما يؤدي بدوره الى احتثات ق.د.ك ضخمة في لفائف المنتج اضافة الى تغير محور فيض التغرة بشكل فجائي. وفي الظروف السيئة قد تتسبب الجهود الضخمة الناتجة في احداث شرارة كبيرة بين قطع المبدل ينتج عنها اقواس تفريغ تحيط بالمبدل وتؤدي الى قصر الفرش.



شكل (10) توزيع الفيض فى آلة التيار المستمر.

1.7.4 الحد من رد فعل المنتج.

بينما يمكن الغاء تأثير رد فعل المنتج على مقدار ق.د.ك المتولدة في المولد و العزم المنتج في المحرك بزيادة ق.د.م المجال فإن ذلك لن يمنع تشوه توزيع الفيض (الناتج عن انحراف محور التعادل المغناطيسي) ومايسببه من

مصاعب في عملية التبديل. لذلك يمكن في الحياة العملية الحد من اثار رد فعل المنتج باحدى الطرق التالية:

1 - زيادة ممانعة الدائرة المغناطيسية عند حافتي القطب مقارنة بمركزه مما يجبر خطوط فيض المجال على التدفق نحو مركز القطب في المسار الاقل ممانعة ويحد بالتالي من تشوه الفيض. ويمكن تحقيق ذلك عمليا بجعل نصف قطر قوس وجه القطب اكبر من نصف قطر المنتج مما يجعل الثغرة الهوائية بين حافتي القطب اكبر منها عند المركز.

2 - ازاحة محور الفرش لينطبق على محور التعادل المغناطيسي للحصول على تبديل ناعم. ويعيب ذلك بقاء انخفاض فيض الثغرة الهوائية ومن ثم ق.د.ك المنتج، ونظرا لان ق.د.م المنتج تتناسب مع تيار المنتج ومن ثم مع الحمولة فإن زاوية الازاحة يجب ان تتغير مع الحمل دائماً". وعند ازاحة الفرش عن المحور المتعامد يمكن تحليل رد فعل المنتج الى مركبة المغنطة المضادة (demagetization) في اتجاه المحور المباشر ومركبة المغنطة العرضية (cross magetization) في اتجاه المحور المتعامد كما في الشكل (11). وعند ازاحة فرش المولد الى الامام بزاوية θ (بالدرجات الكهربائية) فإن الموصلات المحصورة في النطاق 2θ حول المحور المتعامد ستنتج ق.د.م المغنطة المضادة F_d بينما تنتج باقي الموصلات ق.د.م المغنطة العرضية F_q. ويمكن من الشكل (11) حساب ق.د.م المركبتين بقسمة ق.د.م المنتج لكل قطب F_a طبقا لنسبة الزاويا بالدرجات الكهربائية التي تشغلها الموصلات المنتجة للمركبتين كما يلي:

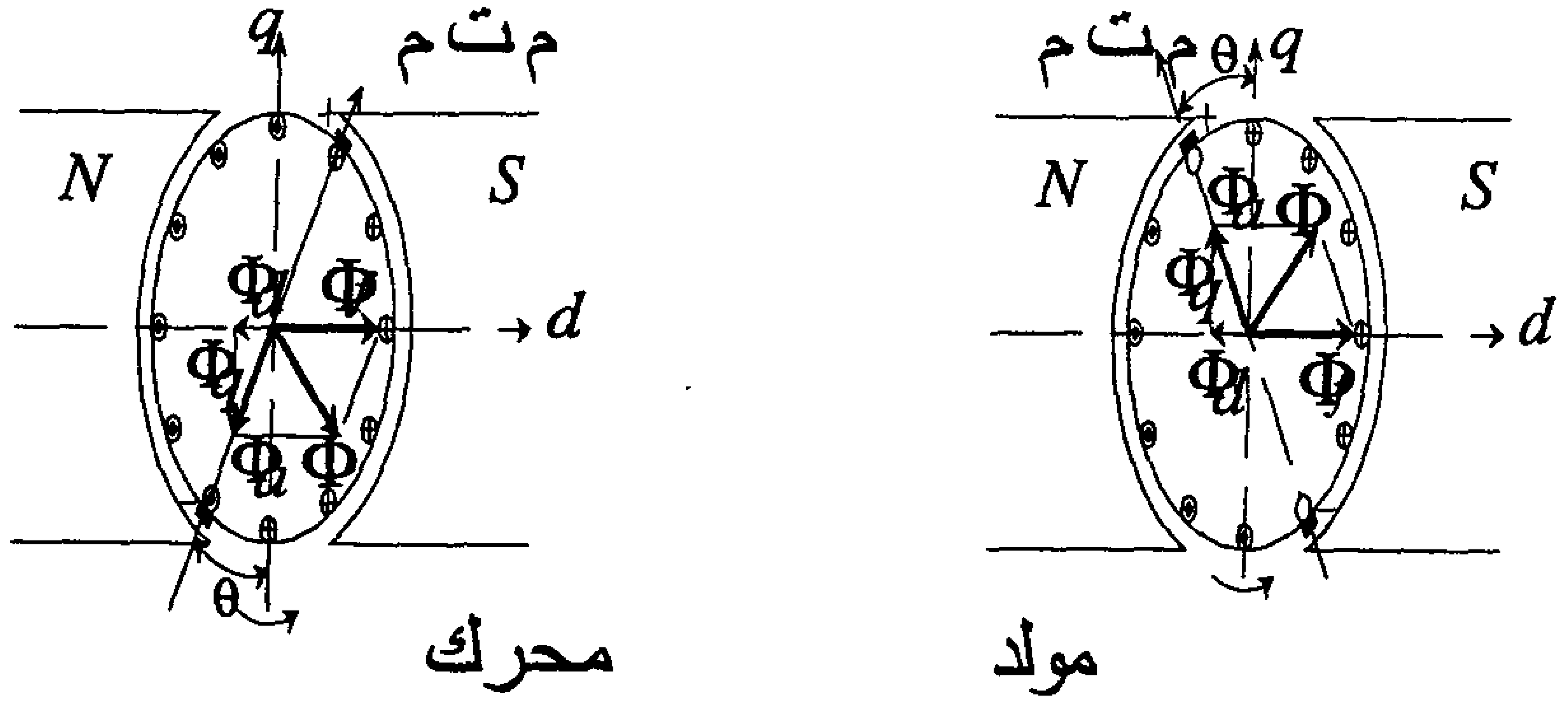
$$F_a = (Z/2)\,(I_a/a)\,/\,2p \qquad (4.26)$$

$$F_d = F_a\,(4\theta/2\pi) = F_a\,(2\theta/\pi) \qquad (4.27)$$

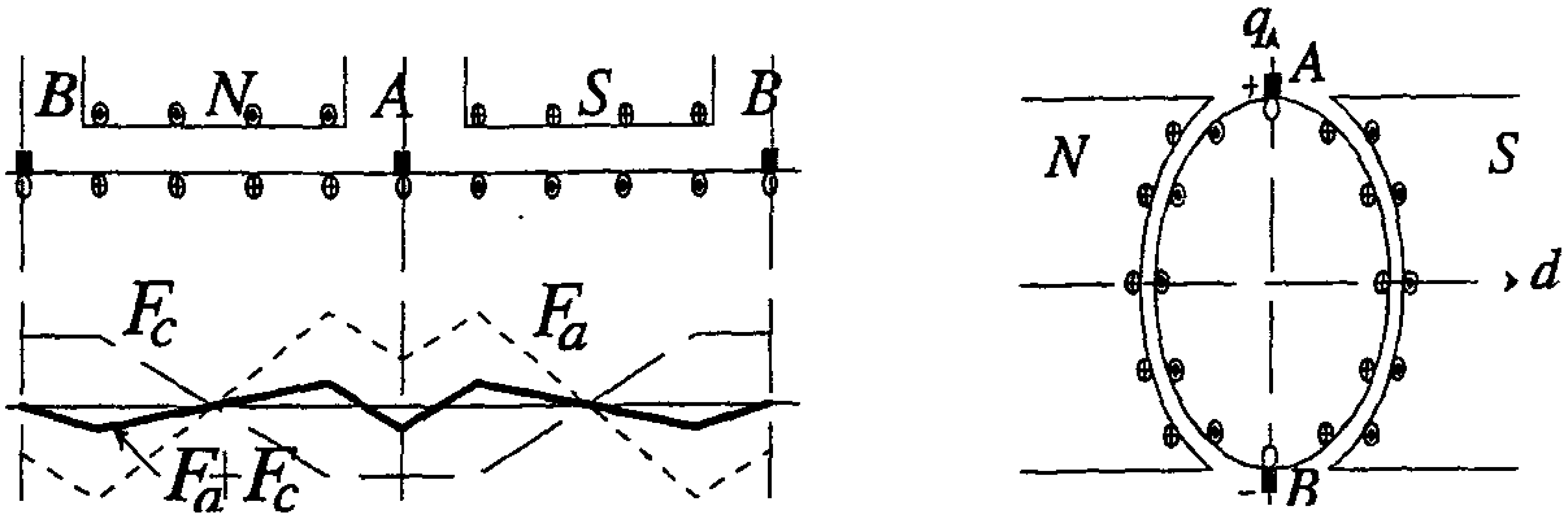
$$F_q = F_a\,[2(\pi-2\theta)/2\pi] = F_a\,(1 - 2\theta/\pi) \qquad (4.28)$$

3- استخدام لفائف التعويض (compensating windings) التي توضع موصلاتها في شقوب في وجه القطب وتلف بين كل قطبين متجاورين. ويتم توصيل هذه الملفات على التوالي مع ملفات المنتج بحيث يكون اتجاه التيار في موصلات وجه القطب معاكساً لاتجاه التيار في موصلات المنتج التي تقابله كما هو مبين في الشكل (12). وللقضاء كلياً على آثار رد فعل المنتج يجب ان تكون ق.د.م لفائف التعويض مساوية لـ ق.د.م المنتج بحيث يؤدي تغير تيار المنتج الى انتاج تأثير معاكس في لفائف التعويض يقضي على تشوه وانخفاض ق.د.م المجال. وعملياً تقوم لفائف التعويض بمعادلة ق.د.م لفائف المنتج الواقعة تحت وجه القطب فقط، حيث تساهم اقطاب التبديل في معادلة ق.د.م اللفائف الواقعة بين الاقطاب. واذا كان طول قوس وجه القطب y_x وخطوة القطب y_p يمكن من المعادلة (4.26) التعبير عن ق.د.م لفائف المنتج الفعالة F_x ومن تم الحصول على ق.د.م لفائف التعويض $(F_c=Z_cI_a/2)$ لكل قطب كما يلي:

$$F_c = F_x = (y_x/y_p)F_a \sim 0.7(Z/2)(I_a/a)/2p \qquad (4.29)$$



شكل (11) مركبات الفيض في المولد والمحرك عند ازاحة محور الفرش.



شكل (12) ترتيب وتوزيع ق.د.م لفائف التعويض.

8.4 التبديل.

بالاضافة الى توصيل لفائف المنتج بالفرش يقوم المبدل بتغيير ق.د.ك وتيار لفائف المنتج المترددين الى كميات احادية الاتجاه (مستمرة) بين فرش المولد وتغيير تيار الفرش المستمر الى تيار متردد فى لفائف المنتج لانتاج عزم موحد الاتجاه في المحرك. وباستمرار تكون الفرش متصلة بقطع المبدل المتصلة بالملفات التي تعبر محور التعادل المغناطيسي، حيث يتزامن انتقال الفرش بين قطعتي الملف مع انعكاس اتجاه ق.د.ك والتيار فيه. ويسمى انتقال الفرش بين قطعتي الملف لحظة انعكاس التيار فيه بعملية التبديل (commutation) التي تستغرق مدة تسمى بزمن التبديل تقوم خلاله الفرش بقصر الملف الذي يعبر خط التعادل اثناء انتقالها بين قطعتيه. واذا كانت سرعة المنتج N د/د وكان عدد قطع المبدل C وكانت الفرشاة الواحدة تغطي C_b قطعة يكون زمن دورة المبدل $60/N$ ثانية ويكون زمن التبديل (الذي يبقي خلاله الملف مقصورا" حتى تعبر القطعة الفرشاة) كما يلي:

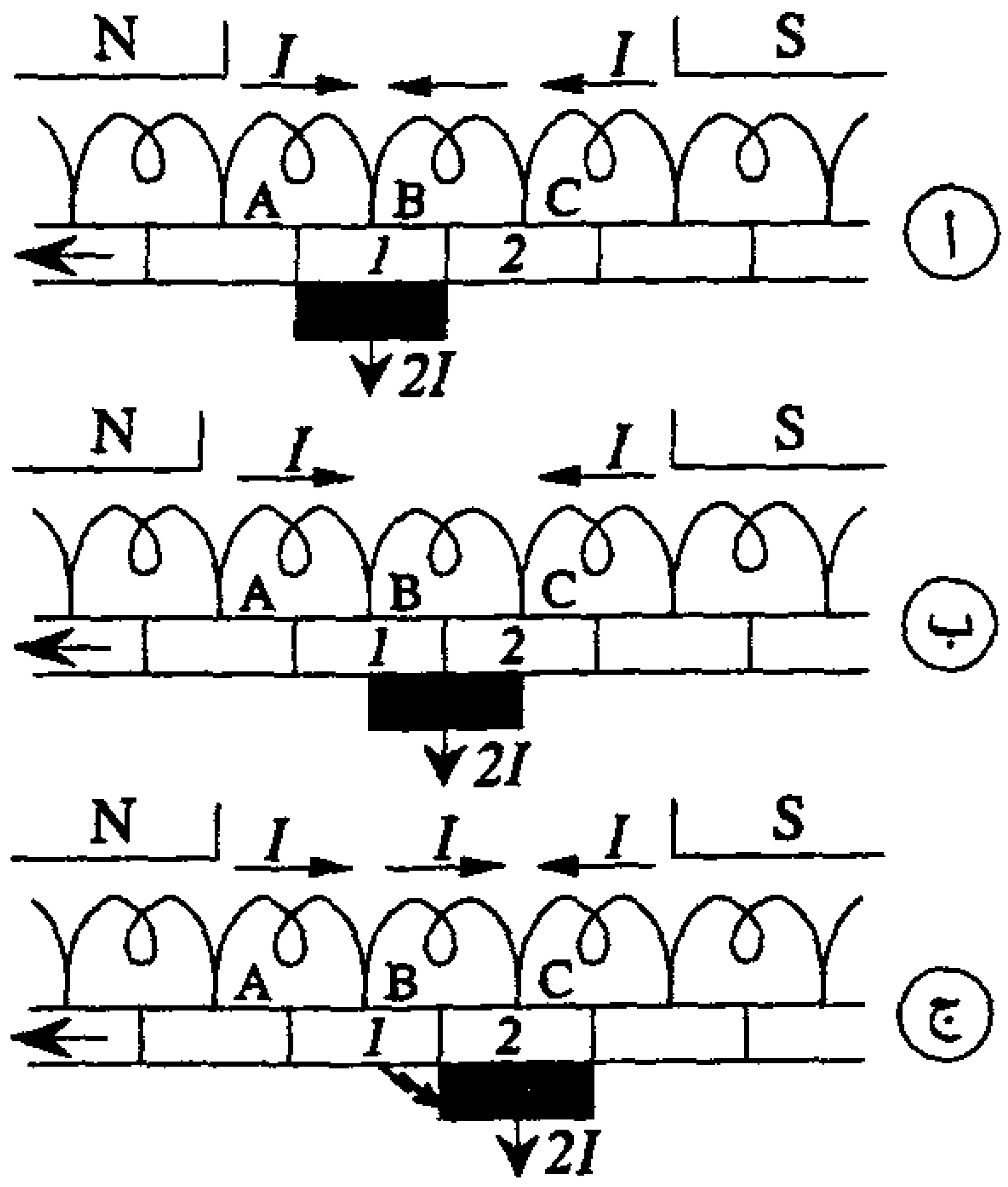
$$t_c = (60/N)/(C/C_b) = 60C_b/NC \qquad (4.30)$$

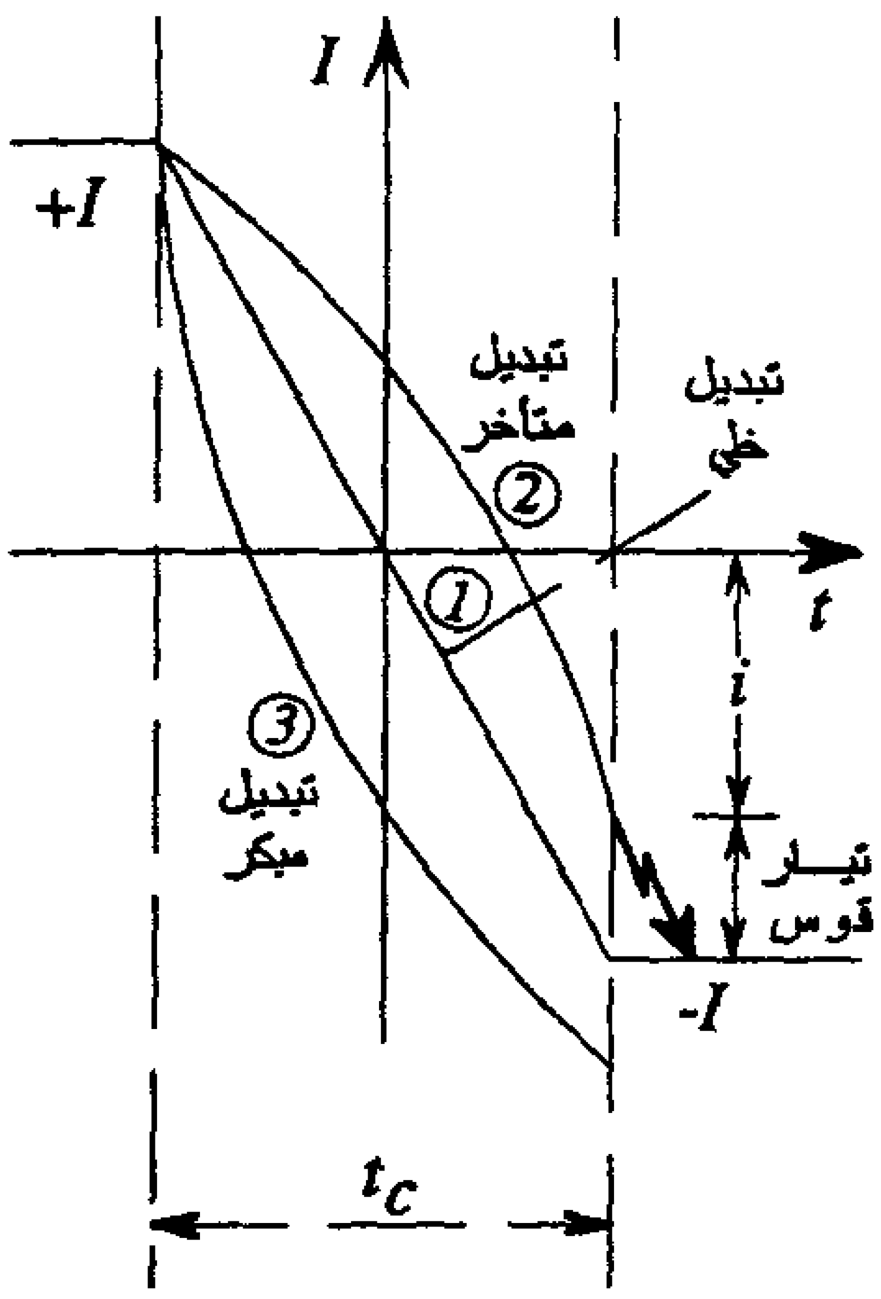
ويبين الشكل (13) مراحل انتقال الفرشاة الموجبة بين قطع المبدل الموصلة بالملف الواقع في منطقة التعادل لمولد بسيط ذو قطبين يدور منتجه ضد اتجاه عقارب الساعة. وتوزع لفائف المنتج في هذه الحالة على مسارين متوازيين يحمل كل منها نصف تيار المنتج ويكون اتجاه التيار في الموصلات المقابلة لقطب ما عكس اتجاهها في الموصلات المقابلة لقطب معاكس. وفي الشكل (13) تبين الصورة (أ) لحظة اتصال الفرشاة بالقطعة 1 فقط وتدفق التيار $+I_C$ في الملف B. ومع انتقال الفرشاة من القطعة 1 الى 2 يبداء قصر الملف B وينخفض تياره تدريجيا" الى الصفر عندما تغطي الفرشاة القطعتين 1 و 2 بالتساوي كما في الصورة (ب). ثم يبداء تيار الملف B في الزيادة في الاتجاه المعاكس تدريجيا" ليبلغ معكوسه $-I_C$ عند مغادرة الفرشاة للقطعة 1 وانتهاء قصر الملف كما في الصورة (ج).

واذا كان توزيع تيار الفرشاة بين القطعتين يتحدد فقط بمساحة الاتصال بينها وبين القطعتين، سيتناقص التيار خلال الملف B من $+I$ اثناء اتصال الفرشاة بالقطعة 1 فقط ليصل الى الصفر اثناء ملامسة الفرشاة للقطعتين 1 و 2 بالتساوي، ثم يزداد في الاتجاه المعاكس ليصل الى $-I$ اثناء أتصال الفرشاة بالقطعة 2 فقط وكما يمثله الخط **1** فى الشكل (14). ويشار الى التبديل في هذه الحالة المثالية بانه خطي (linear) لايحدث اي مشاكل في التبديل لكون اتمام انعكاس تيار الملف B يتزامن مع انتهاء الاتصال بين الفرشاة والقطعة 1. ولكننا نجد في الواقع انه طبقا" لقانون فارداي سيؤدي قلب اتجاه التيار في الملف ذو المحاثة L_C في زمن التبديل t_C الى احتثاث ق.د.ك e_r تعرف بجهد المفاعلة (reactance voltage) ويمكن التعبير عنها كما يلى:

$$e_r = Ldi_C/dt = 2L_CI_C/t_C \qquad (4.31)$$

وطبقا لقانون لينز يعاكس جهد المفاعلة تغير التيار ويتسبب فى تآخر انعكاسه فى الملف المقصور بحسب الثابت الزمني لدائرته. وينتج عن ذلك عدم اكتمال انعكاس تيار الملف B لحظة مغادرة الفرشاة للقطعة 1 كليا" كما يمثله المنحني 2 في الشكل (14). وهنا لايمكن لعملية التبديل ان تكتمل الا بانشاء قوس كهربائي بين القطعة 1 والفرشاة كما في الصورة (ج) في الشكل (13). ويشار الى التبديل في هذه الحالة بانه متأخر ويقابله التبديل المبكر الذي ينتج عن كبر معدل تغير تيار الملف.





شكل (13) مراحل التبديل. **شكل (14) تغير تيار الملف اثناء التبديل**

1.8.4 طرق تحسين التبديل.

تبين مما سبق ان رداءة التبديل تعود اساسا" الى ازاحة محور التعادل المغناطيسي الناتج عن رد فعل المنتج وجهد المفاعلة الناتج عن آلية التبديل. وكذلك يمكن ان يتسبب ارتفاع درجة حرارة الفرش نتيجة للحمل المفرط (over load) والغبار الموصل المتراكم بين قطع المبدل بالاضافة الى الفرش البالية والمرتخية فى رداءة التبديل. وعمليا" يمكن الحد من تأثير العوامل الاخيرة باستخدام فرش ذات جودة عالية والحفاظ على نعومتها ونظافة المبدل وعوازله وضبط ضغط التلامس بين الفرش وقطع المبدل. وفي الصدد يمكن

تلخيص خصائص انواع الفرش الكربونية المستخدمة فى الحياة العملية كما يلي:

أ - فرش الكربون العادى التى تمتاز بكبر مقاومتها ورخصها ويعيبها كبر معامل احتكاكها مع قطع المبدل مما لا يجعلها مناسبة فى حالات الجهد المنخفض وحالات التشغيل القاسية ذات التيار المرتفع.

ب - فرش الجرافيت التي تمتاز بكبر مقاومتها اضافة الى متانتها ونعومتها وانتظام اتصالها مع قطع المبدل ولكنها اكثر تكلفة. وبذلك تكون هذه الفرش مناسبة فى حالات السرعة العالية وعندما يتوجب خفض الضوضاء الناتجة عن الاحتكاك.

ج - الفرش المصنوعة من خليط من الكربون والنحاس والتى تمتاز بانخفاض مقاومتها وكبر سعتها لنقل التيار اضافة الى صغر معامل احتكاكها وارتفاع كلفتها. وبذلك تكون هذه الفرش مناسبة في حالات الآلات منخفضة الجهد مرتفعة التيار.

وتوجد عدة طرق لتحسين التبديل حيث يقوم عمل بعضها على الحد من نتائج رداءة التبديل كما في طريقة زيادة مقاومة الاتصال، بينما يقوم عمل البعض الآخر على معالجة مسببات رداءة التبديل كما في طريقة ازاحة محور الفرش وطريقة استخدام اقطاب التبديل. وعليه يمكن تلخيص خصائص طرق تحسين التبديل المستخدمة عمليا" في آلات التيار المستمر كما يلي:

1- زيادة مقاومة الاتصال: وهي تهدف الى زيادة مقاومة الاتصال بين الفرش والمبدل لخفض تيار القوس بين الفرشاة والقطعة التى على وشك مغادرتها. فمن الواضح من الشكل (13) ان كبر مقاومة الاتصال بين الفرشاة والقطعة 1 مع صغر مساحة الاتصال بينهما سيجعل معظم تيار المنتج ينتقل من خلال القطعة 2 ويقلل من تيار القوس بين القطعة

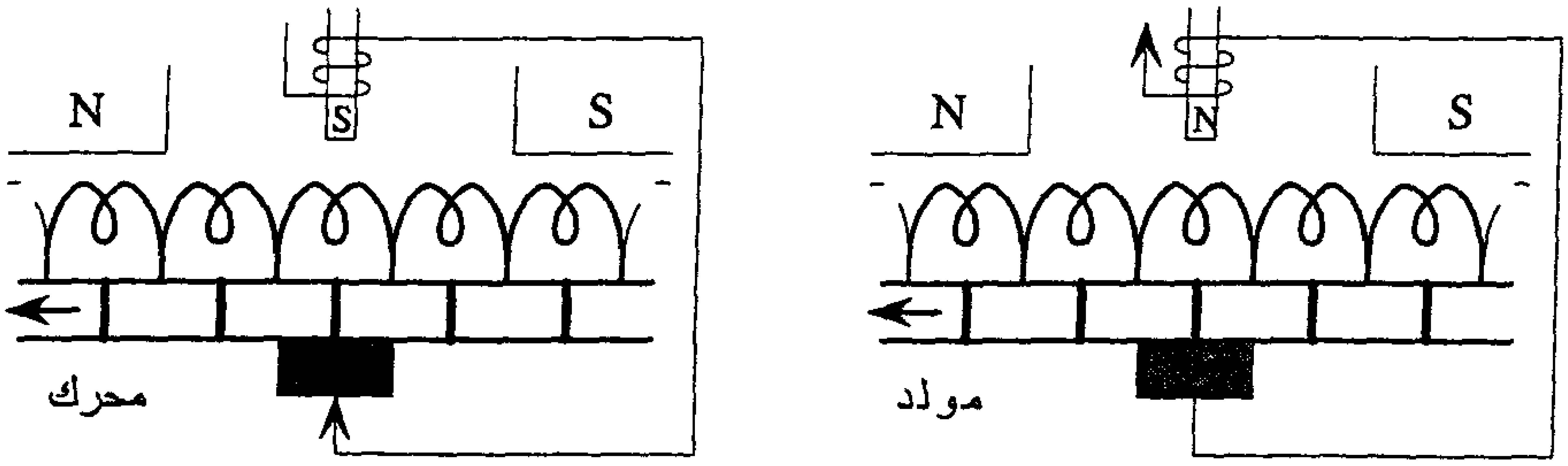
1 والفرشـاة. ويعـد ذلـك احـد اهـم الاسـباب الرئيسـية وراء انتشـار استعمال الفرش الكربونية فى الحياة العملية. ويعيب هذه الطريقة انها لاتقضي على مسببات رداءة التبديل ولكنها تقلل من اضراره، ولكن هذا الاجراء لايكفي لوحده الا في الآلات الصغيرة.

2 - ازاحة محور الفرش: وتهدف الى معادلة جهد المفاعلة الذي يعد السبب الرئيسي فى رداءة التبديل حيث يتم ذلك بازاحة محور الفرش عن المحور المتعامد لكي لايكون الملف منطبقا" عليه كليا" اثناء التبديل ولاتكون ق.د.ك المحتثة فيه صفرا". وتحدد درجة الازاحة بما يجعل ق.د.ك المحتثة في الملف بواسطة المجال الرئيسي كافية لمعادلة والغاء جهد المفاعلة ومن تم جعل جهد الملف صفرا" اثناء التبديل. ويعيب هذه الطريقة تغير درجة الازاحة المطلوبة مع الحمل وزيادة ق.د.م المغنطة المضادة للمجال الرئيسي مما يؤدي الى انخفاض ق.د.ك المتولدة فى المولد والعزم المنتج فى المحرك.

3 - الاقطاب البينية (اقطاب التبديل): وهي تستخدم لمعادلة جهد المفاعلة ومن تم الغاء محصلة جهد الملف اثناء تبديل تياره. وتثبت الاقطاب البينية فى المنتصف بين الاقطاب الرئيسية لتحثث في الملف تحت التبديل ق.د.ك تعادل جهد المفاعلة. وتحدد قطبية القطب البيني لتماثل القطب الرئيسي الذى يتقدمه في اتجاه دوران المولد، ويليه فى اتجاه دوران المحرك. وتوصل لفائف الاقطاب البينية على التوالي مع المنتج لتكون ق.د.ك المحتثة بواسطتها قادرة على معادلة جهد المفاعلة عند اي حمولة كما في الشكل (15). وتقوم ق.د.م القطب البيني بمعادلة ق.د.م لفائف المنتج (لكل قطب) عند المحور المتعامد اضافة الى ق.د.م اللازمة لانشاء الفيض المطلوب خلال الدائرة المغناطيسية للاقطاب البينية. ونظرا" لتكلفتها لاتستخدم اقطاب التبديل الا مع الآلات الكبيرة حيث عادة ما تكون التغرة الهوائية للقطب البيني كبيرة

لتثبيت ممانعة مساره مجاله، ويحدد عدد لفاته لتكون ق.د.م القطب F_i تزيد 30% عن ق.د.م المنتج لكل قطب كما يلي:

$$F_i \sim 1.3F_a \sim 1.3(Z/2)(I_a/a)/2p \qquad (4.32)$$



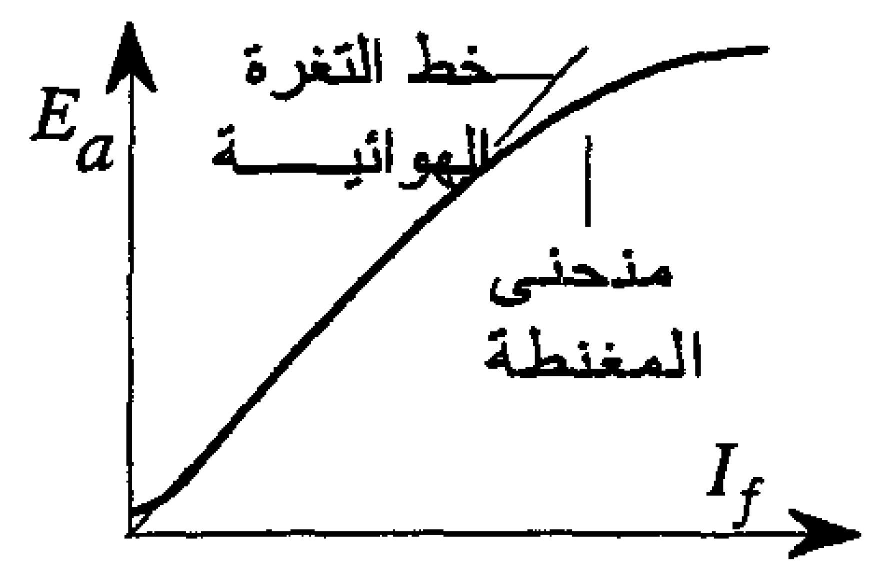
شكل (15) اقطاب التبديل.

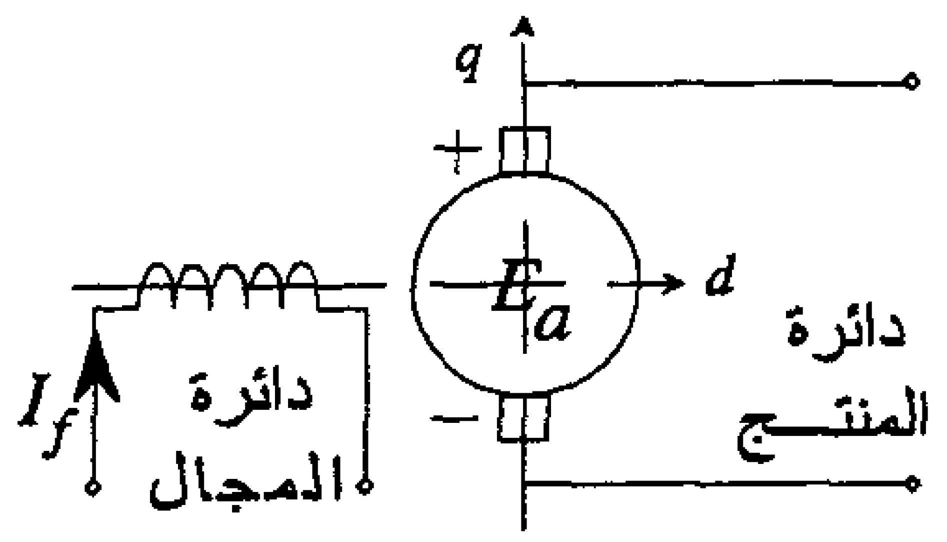
9.4 اثارة آلات التيار المستمر وتصنيفها.

عند اهمال ق.د.م المضادة للمغنطة والناتجة عن رد فعل المنتج ينظر الى آلة التيار المستمر على انها تضم دائرتين متميزتين غير مقترنتين يمثلهما دائرتي المجال والمنتج وينتج عنهما ق.د.م متعامدتين، ق.د.م المجال على طول المحور المباشر d-axis و ق.د.م المنتج على طول المحور المتعامد q-axis حيث يمكن تمثيل الآلة كما هو مبين في الشكل (15). ويعتمد الفيض لكل قطب على ق.د.م المجال Ff وممانعة المسار المغناطيسي الذي يضم على التوالى لب القطب والتغرة الهوائية ولب المنتج (مع الاسنان) ثم التغرة الهوائية ولب القطب المعاكس والاطار. وعند قيم الفيض المنخفضة يمكن اعتبار نفاذية الحديد مالانهاية ومن تم اهمال ممانعتة ليتحدد الفيض بممانعة التغرة الهوائية فقط $(\Phi = Ff/S_g)$.

وطالما استمر اهمال ممانعة الحديد ستكون العلاقة بين ق.د.م المجال والفيض خطية ويمثلها ما يسمى بخط التغرة الهوائية. ولكن الزيادة الكبيرة في الفيض ستؤدي الى تشبع الحديد (وخصوصا" عند اسنان المنتج) وتصبح

العلاقة بين ق.د.م المجال غير خطية كما هو مبين بمنحنى المغنطة في الشكل (15). ونظرا" لان ق.د.م المجال ($F_f=N_fI_f$) تتناسب مع تيار المجال I_f و ق.د.ك المنتج ($E_a=K_a\omega\Phi$) تتناسب مع الفيض، يمكن التعبير عن منحنى المغنطة بالعلاقة بين ق.د.ك المنتج وتيار الاثارة عند ثبوت السرعة حيث يمكن الحصول على منحنيات مختلفة عند تغير السرعة. وبصفة عامة يعد منحنى المغنطة الذي يتم الحصول عليه معمليا" ذو اهمية كبرى لكونه يمثل مستوى التشبع في الآلة عند مستويات اثارة مختلفة.





شكل (15) تمثيل آلة التيار المستمر.

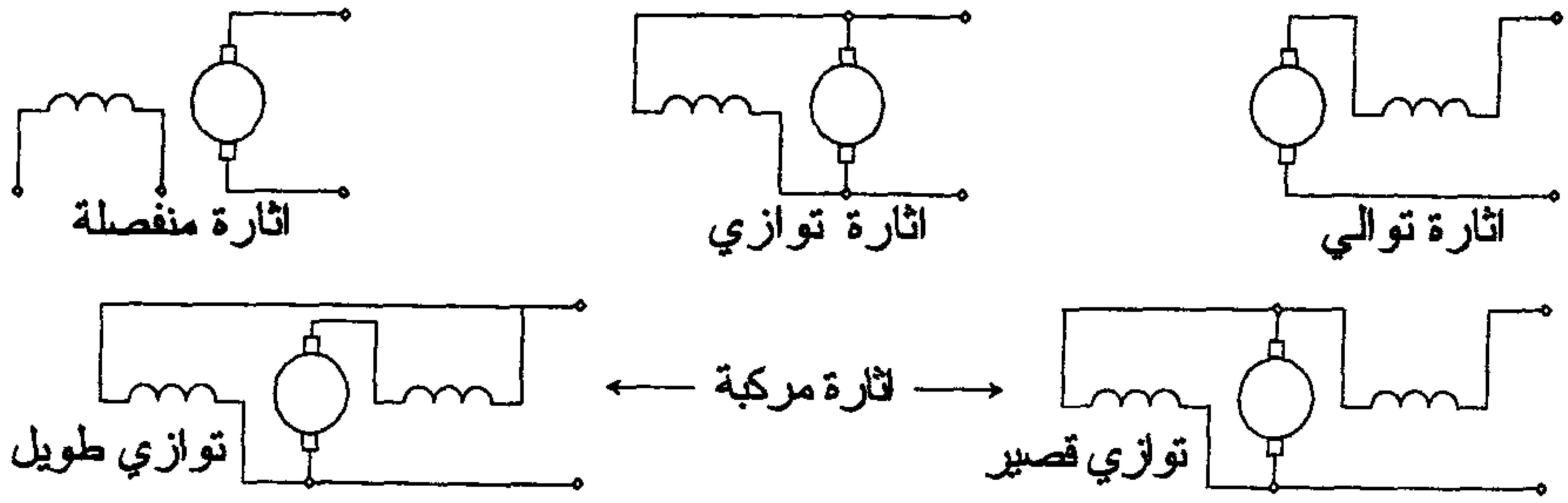
ويميز آلة التيار المستمر امكانية الحصول على خصائص اداء متنوعة وفقا" للكيفية التي يتم بها تغدية دائرة المجال حيث يمكن الحصول على ذلك من مصدر منفصل او ذاتيا" من اطراف المنتج. وتجهز دائرة المجال بواحد او كل من لفائف مجال التوازي (shunt field winding) التي تغدى من مصدر منفصل او ذاتيا" بتوصيلها على التوازي مع المنتج، ولفائف مجال التوالي (series field winding) التي تغدى ذاتيا" بتوصيلها على التوالي مع المنتج. وبينما تضم لفائف التوازي عدد لفات كبير ولاتسحب اكثر من حوالى 5% من مقنن تيار الآلة، فإن لفائف التوالي تضم عدد اقل من اللفات ولكنها تحمل تيار المنتج كاملا". وعند وجود النوعين معا" تلف لفائف التوالي فوق لفائف التوازي. وتصنف آلة التيار المستمر سواء كانت مولد ام محرك طبقا للطريقة التى يتم بها تغدية تيار الاثارة (exciting current) للفائف المجال الى الانواع التالية وكما هو مبين في الشكل (16):

1 - آلة ذات اثارة منفصلة (separate excitation) وتثار بتغدية لفائف التوازي من مصدر منفصل.

2 - آلة مثارة على التوازي (shunt excitation) وتثار ذاتيا" بتوصيل لفائف التوازي على التوازي مع دائرة المنتج.

3 - آلة مثارة على التوالي (series excitation) وتثار ذاتيا" بتوصيل لفائف التوالي على التوالي مع دائرة المنتج.

4 - آلة ذات اثارة مركبة (compound excitation) وتثار بتوصيل لفائف التوازي على التوازى مع دائرة المنتج ولفائف التوالي على التوالي معها. ويمكن ان تكون الاثارة المركبة قصيرة التوازى (short shunt) بتوصيل لفائف التوازى عبر المنتج فقط، او طويلة التوازى (long shunt) بتوصيل لفائف التوازى عبر المنتج ولفائف التوالي معا".



شكل (16) تصنيف آلة التيار المستمر.

10.4 خصائص مولدات التيار المستمر.

يتطلب تقييم اداء المولد منحنى العلاقة بين جهد وتيار الحمولة والذي يعرف بالخاصية الخارجية (external characteristic) ومنحنى المغنطة الذي يعرف بخاصية الدائرة المفتوحة (open-circuit characteristic). وعند تشغيل المولد المثارة ذاتيا" على التوازي ستحثث المغناطيسية المتبقية ق.د.ك صغيرة تؤدي عند غلق دائرة المجال الى تدفق تيار المجال ومن تم انشاء

الفيض اللازم لاحتثات ق.د.ك الكاملة في الحالة المستقرة. واذا كانت المقاومة الكلية لدائرة المجال R_{ft} ومحاثتها L يمكن عند ثبوت السرعة واهمال مقاومة ومحاثة المنتج (لصغرهما مقارنة بقيم دائرة المجال) التعبير من المعادلة (22) عن ق.د.ك البدء e_a ومن تم معدل تغير تيار المجال i_f عند البدء كما يلي ($i_f \propto \Phi$):

$$e_a \approx V = i_f R_{ft} + L di_f/dt = K_a \Phi \omega = K.I_f \qquad (4.33)$$

$$di_f/dt = i_f (K - R_{ft})/L \qquad (4.34)$$

ويتناسب K الذي يمثل ميل خط التغرة الهوائية (منحنى المغنطة) طرديا" مع السرعة وعكسيا" مع مستوى التشبع المغناطيسي. وتبين المعادلة (33) ان وصول e_a الى قيمة الحالة المستقرة $e_a \approx V= i_f R_{ft}$ بنهاية الحالة العابرة يتوقف على نمط تغير التيار i_f. وتبين المعادلة (34) ان نمط تغير تيار الاثارة يتوقف على المقدار $(K\text{-}R_{ft})$ والثابت الزمني $T=L/(K\text{-}R_{ft})$. وتسمى قيمة المقاومة الكلية لدائرة المجال والتي تجعل المقدار $(K\text{-}R_{ft})$ يساوي الصفر بالمقاومة الحرجة (critical resistance). وعند اي سرعة (اي عند قيمة محددة للعامل K) يمكن تلخيص شروط بناء ق.د.ك في المولد المثار ذاتيا" فيما يلي:

1 - ان توجد مغناطيسية متبقية كافية في الدائرة المغناطيسية.

2 - ان تدعم ق.د.م لفائف المجال المغناطيسية المتبقية (K موجبة).

3 - ان تكون المقاومة الكلية لدائرة المجال اصغر من المقاومة الحرجة ($R_{ft}<K$).

1.10.4 المولد منفصل الاثارة.

يمكن تمثيل المولد منفصل الاثارة بالدائرة المبينة في الشكل (17- أ) حيث تمثل R_{ft} مقاومة دائرة المجال التي تضم مقاومة لفائف

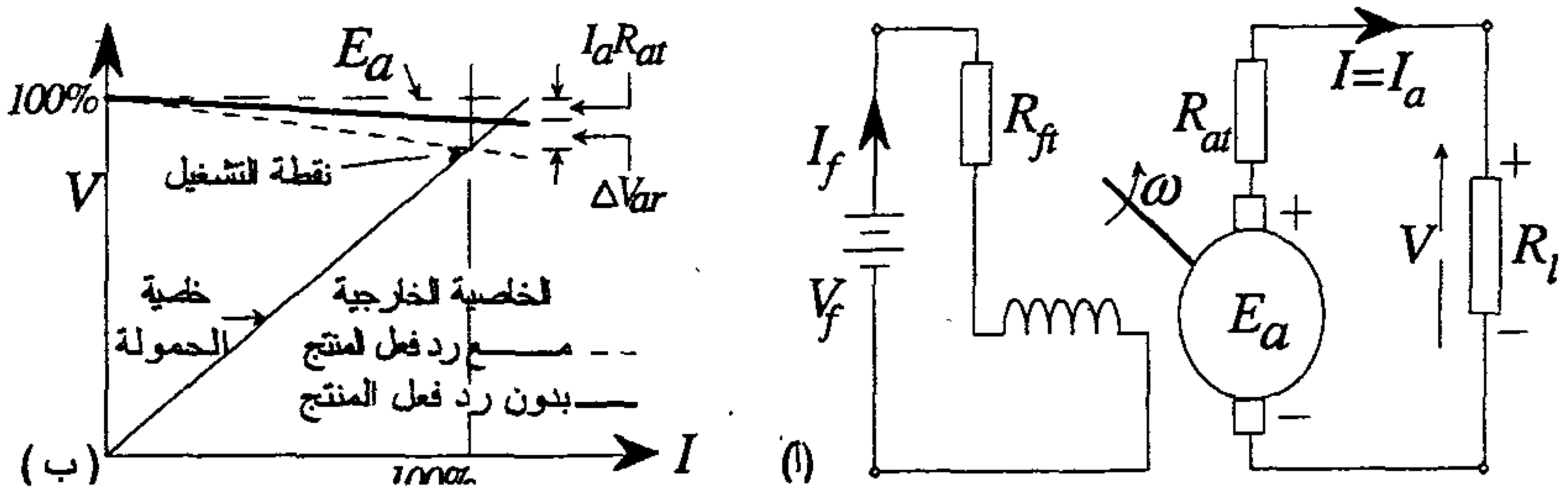
التوازي R_{ff} اضافة الى مقاومة التحكم ان وجدت، بينما تمثل R_{at} مقاومة دائرة المنتج التي تضم مقاومة لفائف المنتج R_a اضافة الى مقاومات لفائف التعويض R_c والاقطاب البينية R_i ومقاومة التحكم R_{ac} ان وجدت. وعادة ما ينظر الى مقاومة الاتصال بين الفرش والمبدل باعتبار هبوط الجهد فيها حولى 2 فولت او انها تهمل كليا". وعند تغدية لفائف التوازي بالجهد V_f وادارة المنتج بسرعة N د/د يتدفق تيار المجال I_f في دائرة المجال وتحتث الـ ق.د.ك E_a فى لفائف المنتج. ويؤدى تحميل المولد الى تدفق التيار $I=I_a$ فى لفائف المنتج والحمولة وظهور الجهد V عبر مقاومة الحمولة R_l، حيث:

$$V = E_a - I_aR_{at} \qquad (4.33)$$

$$V = IR_l \qquad (4.34)$$

$$V_f = I_f R_{ft} \qquad (4.35)$$

وتمثل المعادلة (4.33) الخاصية الخارجية لمولد منفصل الاثارة حيث يلاحظ عند ثبوت تيار الاثارة واهمال رد فعل المنتج ان E_a تبقى ثابتة بينما ينخفض جهد الحمولة V خطيا" مع زيادة تيار الحمولة I نتيجة لهبوط الجهد في مقاومة المنتج. ونظرا" لصغر مقاومة المنتج يكون هبوط الجهد صغير ويمكن اعتبار جهد الحمولة شبه ثابت في هذه الحالة. وفي الواقع يؤدي رد فعل المنتج الى هبوط اضافي في الجهد بسبب المغنطة المضادة والتشبع المغناطيسي الناتجين عنه وكما يتضح في الشكل (17- ب). وعند رسم منحنى خاصية الحمل (load chracteristic) الذي تمثله المعادلة (4.34) ستبين نقطة تقاطعه مع منحنى الخاصية الخارجية نقطة تشغيل المولد التى تعطى جهد وتيار الحمولة كما في الشكل (17- ب).



شكل (17) المولد منفصل الاثارة.

2.10.4 المولد المثار على التوازي.

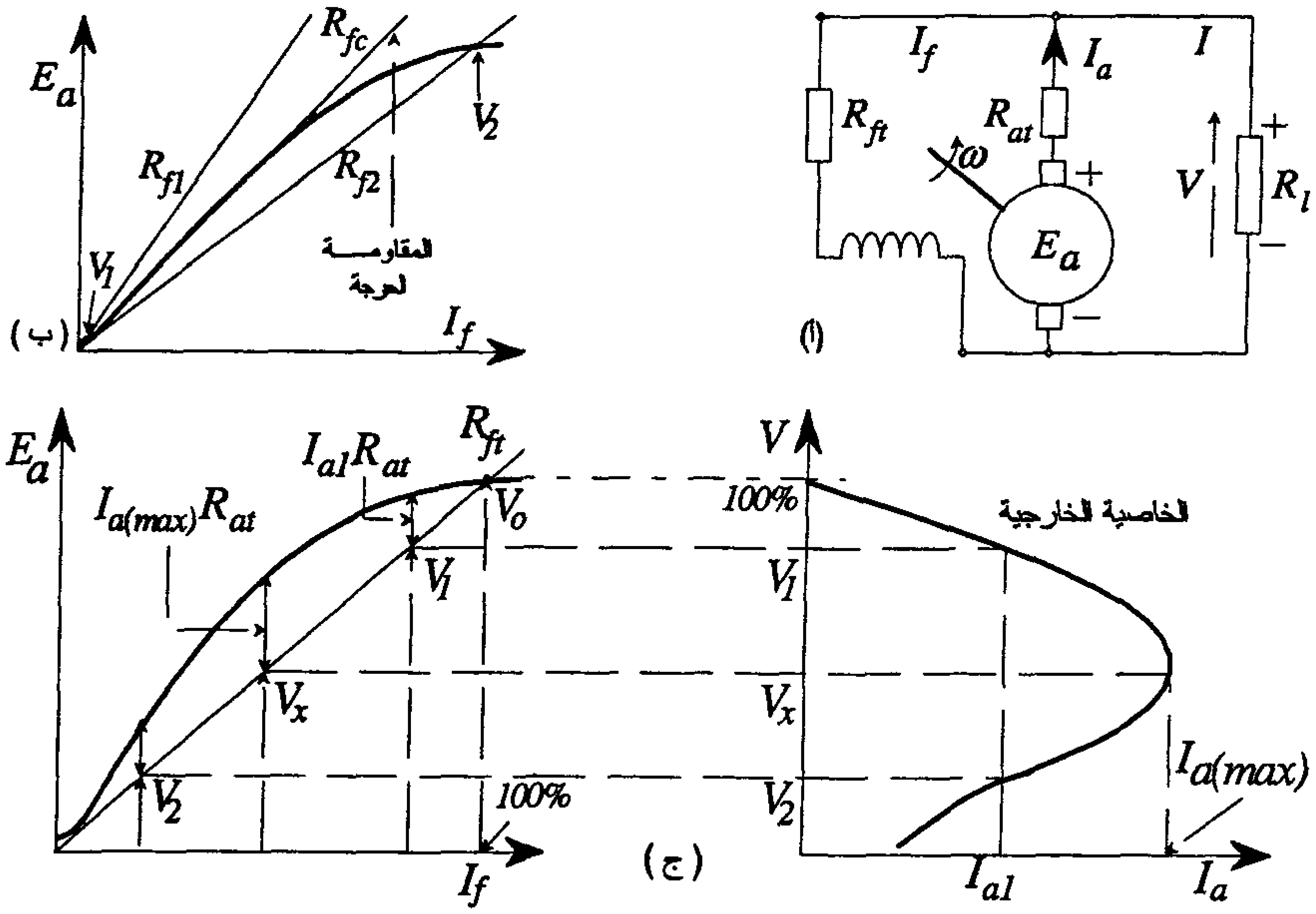
يبين الشكل (18- أ) دائرة مولد توازي يغذى منتجه تيار الحمولة وتيار المجال الذي يجب الايتجاوز حوالى 5٪ من مقنن التيار. ويتطلب ذلك مقاومة لفائف توازي كبيرة تستدعي كبر عدد اللفات وصغر مساحة مقطع السلك. ولابد في هذه الحالة من توفر مغناطيسية متبقية ليبني المولد جهد. ويبين الشكل (18- ب) منحنى المغنطة وخط مقاومة المجال $(V=I_f R_{ft})$ لقيم R_{ft} مختلفة. وعندما تكون R_{ft} مساوية للمقاومة الحرجة R_{fc} سينطبق خط المقاومة على الجزء الخطي لمنحنى المغنطة (خط التغرة الهوائية) مما يتسبب في حالة عدم استقرر (unstable) للجهد. فاذا كانت المقاومة اصغر من القيمة الحرجة مثل R_{f1} سيتمكن المولد من بناء الجهد المطلوب، بينما لن يتحقق ذلك اذا كانت المقاومة اكبر من القيمة الحرجة مثل R_{f2} حيث يكون هبوط الجهد في مقاومة التوازي اكبر من ق.د.ك المحتثة. وبصفة عامة يمكن كتابة معادلات اداء مولد التوازي كما يلي:

$$V = E_a - I_aR_{at} \quad (4.36)$$

$$I_a = I + I_f \quad (4.37)$$

$$V = I_fR_{ft} \quad (4.38)$$

وتمثل المعادلة (4.36) الخاصية الخارجية لمولد التوازي حيث يلاحظ في البداء ان زيادة الحمولة (بخفض مقاومتها) سيزيد من تيار الحمولة I وبالتالي زيادة تيار المنتج وهبوط الجهد في مقاومة دائرته وهو مايؤدي بدوره الى انخفاض جهد الحمولة V. ولكن انخفاض V سينقص تيار الاثارة ومن ثم E_a مما يزيد من انخفاض V في مولد التوازي مقارنة بالمولد منفصل الاثارة. ومع مواصلة زيادة الحمولة سيصل تيارها الى قيمة عظمى يبداء بعدها في الانخفاض بسبب الانخفاض الكبير في E_a كما في الشكل (18- ج)، حيث يمكن بمعرفة مقاومة المنتج الحصول على الخاصية الخارجية بالرسم من منحنى المغنطة وخط مقاومة التوازي حيث تحدد نقاط الجهد V على الخط ويحسب التيار I من الفرق بين المنحنى والخط (I_aR_a). وكما في المولد منفصل الاثارة يزيد رد فعل المنتج من انخفاض الخاصية الخارجية لمولد التوازي.



شكل (18) المولد المثار على التوازي.

3.10.4 المولد المثار على التوالي.

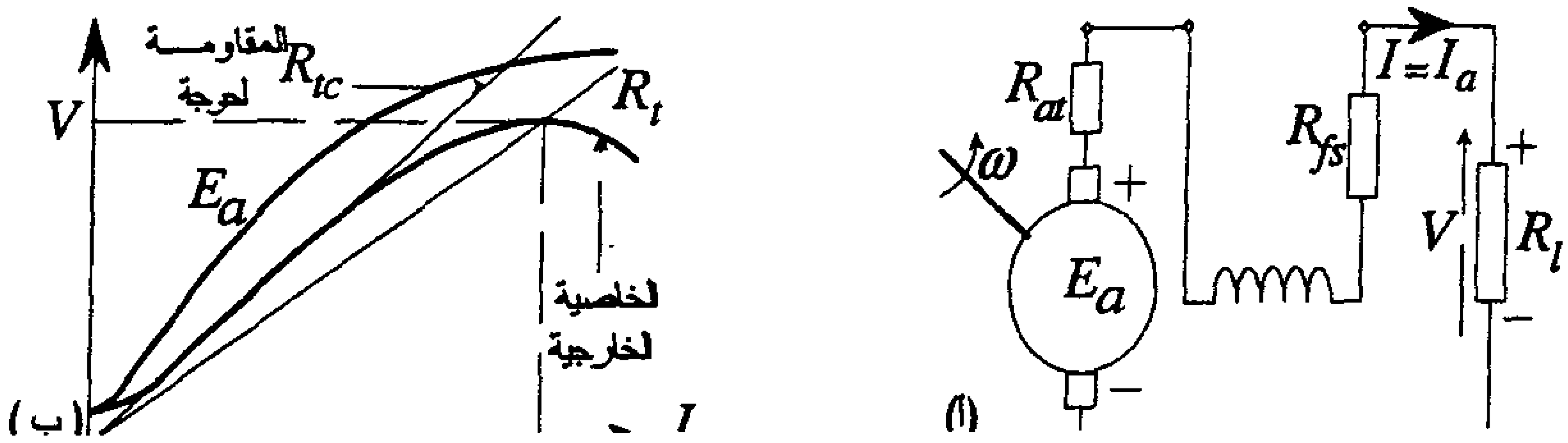
يبين الشكل (19- أ) دائرة مولد تولي حيث يتدفق تيار المنتج بالكامل الى الحمولة من خلال لفائف مجال التوالي التي يجب الايتجاوز هبوط الجهد فيها حوالى 5٪ من مقنن ق.د.ك. ويتطلب ذلك مقاومة لفائف توالي صغيرة تستدعي قلة عدد اللفات وكبر مساحة مقطع السلك. ولابد في هذه الحالة من تحميل المولد لكي يتدفق تيار المجال ويبني المولد الجهد. وكما في مولد التوازي لن يبني مولد التوالي الجهد اذا تجاوزت المقاومة الكلية للمنتج ومجال التوالي والحمولة $\{E_a=I_a(R_{at}+R_{fs}+R_l)\}$ قيمة حرجة R_{tc} تحددها مقاومة الحمولة حيث ينطبق خط المقاومة الحرجة على خط التغرة الهوائية لمنحنى الجهد كما في الشكل (19- ب). وبصفة عامة يمكن كتابة معادلات اداء مولد التوالي كما يلي:

$$V = E_a - I_a(R_{at}+R_{fs}) \qquad (4.39)$$

$$I_f = I = I_a \qquad (4.40)$$

$$V = I_a R_l \qquad (4.41)$$

وتمثل المعادلة (4.39) منحنى الخاصية الخارجية لمولد التوالي الذي يشبه منحنى المغنطة. ويلاحظ في هذه الحالة ان زيادة تيار الحمولة $I=I_a$ ستؤدي الى زيادة E_a ومن تم رفع جهد الحمولة V ببطؤ حتى يبلغ الجهد قيمة عظمى يبداء بعدها في النقصان. ويعود ذلك الى ان زيادة التيار بعد ذلك ستؤدي الى هبوط جهد في دائرة المنتج ومجال التوالي يفوق الزيادة في ق.د.ك المنتج، كما هو مبين في الشكل (18- ب). ومن الجدير بالذكر ان مولد التوالي نادر الاستخدام في الحياة العملية ولكن لفائف التوالي كثيرا" ما تستخدم مع لفائف التوازي في آن واحد وهو ما يجعل دراسة تأثير لفائف التوالي على حدى مجديا".



شكل (19) المولد المثار على التوالي.

4.10.4 المولد ذو الاثارة المركبة.

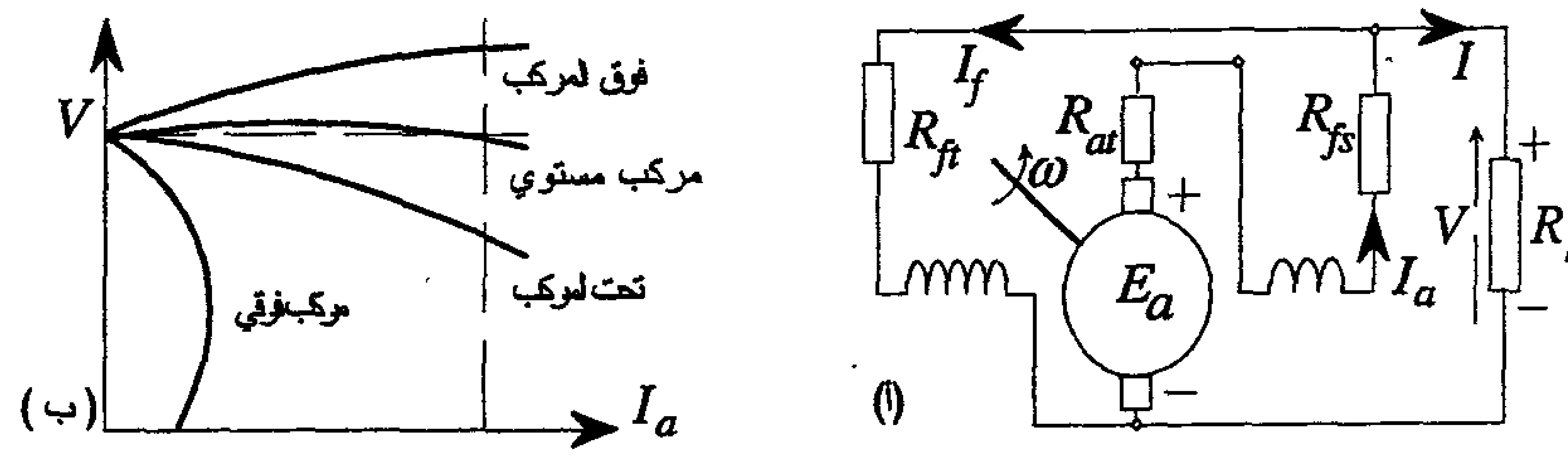
نظرا" لوجود لفائف مجال التوازي والتوالي معا" في المولد المركب فإن خصائصه تجمع بين ميزات مولدي التوازي والتوالي. وسواء كان التراكب طويل ام قصير التوازي فإن ق.د.م لفائف التوالي ستدعم (او تعاكس) ق.د.م لفائف التوازي وهو مايجعل تغير جهد الحمولة تعتمد بشكل اساسي على مقدار دعم (او معاكسة) مجال التوالي لمجال التوازي. وبالتحكم في ق.د.م لفائف التوازي والتوالي يمكن في الظروف المناسبة الحصول على خصائص تحميل متنوعة بما في ذلك عدم تغير الجهد او التيار مع الحمولة. وفي المولد المركب غالبا" ما تكون ق.د.م لفائف التوالي اقل بكثير من ق.د.م لفائف التوازي التي تعد لفائف المجال الرئيسية. ويبين الشكل (20- أ) دائرة مولد مركب طويل التوازي حيث يتدفق تيار المنتج بالكامل في لفائف التوالي ليغذى الحمولة ولفائف التوازي ويمكن كتابة معادلات اداء المولد المركب كما يلي:

$$V = E_a - I_a(R_{at}+R_{fs}) \tag{4.42}$$

$$I_a = I + I_f \tag{4.43}$$

$$V = I_f R_{ft} \tag{4.44}$$

وتبعاً لتوصيلتهما يمكن جعل فيوض لفائف التوازي والتوالي تدعم بعضهما كما في المولد المركب الجمعي (cumulative)، او تعاكس بعضها كما في المولد المركب الفرقي (differential). وفي المولد المركب الجمعي الاكثر شيوعاً تعمل لفائف التوالي على معادلة هبوط الجهد I_aR_{at} ورد فعل المنتج لتحديد نمط تغير E_a ومن ثم V مع الحمولة وفقاً للمعادلة (4.42) التي تمثل الخاصية الخارجية للمولد المركب. وحسب درجة التعويض يمكن لجهد الحمولة ان يزيد مع الحمولة فيما يعرف بالمولد فوق المركب (over-compound)، او ينخفض مع زيادتها فيما يعرف بالمولد تحت المركب (under-compound)، او ان يضل ثابت بين اللاحمل والحمل التام حين يكون المولد مركب مستوي (level-compound)، كما هو مبين في الشكل (20- ب). وفي المقابل يوفر المولد المركب الفرقي مصدر تيار ثابت يمكن الاستفادة منه في بعض التطبيقات الخاصة مثل اللحام.



شكل (20) المولد ذو الاثارة المركبة.

أمثلة محلولة:

1 - احسب خطوات اللف (y_b, y_f, y_c) للفائف المتراكبة البسيطة لمنتج آلة تيار مستمر ذات ستة اقطاب يضم 18 شقب مزدوجة الطبقة يحتوي كل منها على جانبي ملف وذلك لحالتي اللف المتقدم والرجوعي.
[(7,5,+1),(5,7,-1)]

الحل: $S=18$, $2p=6$, $c=2s/2=18*2/2=18$

فى حالة اللف المتقدم: $y_c=+1$

$y_b=(2C/2p)+1=(2*18/6)+1=7$

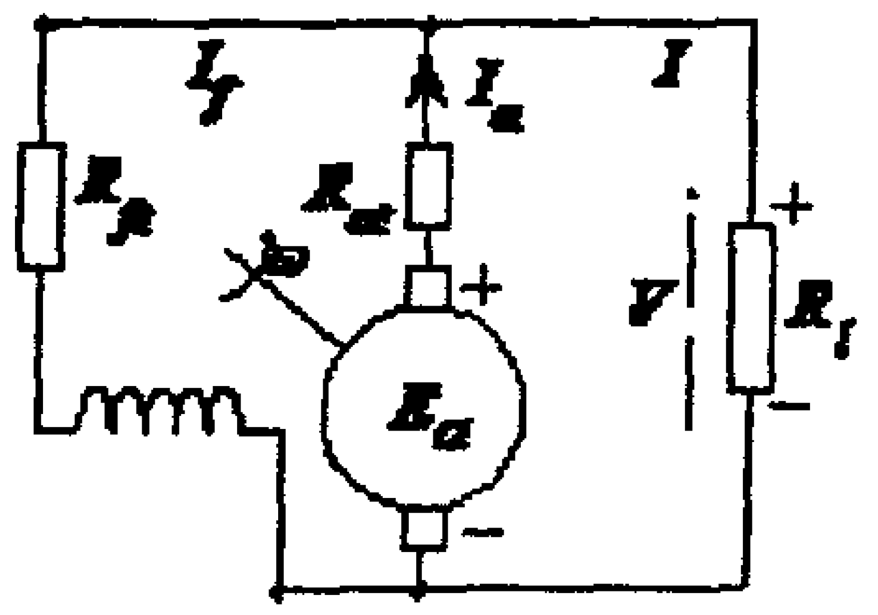
$y_f=(2C/2p)-1=(2*18/6)-1=5$

فى حالة الف الرجوعي: $y_c=-1$

$y_b=(2C/2p)-1=(2*18/6)-1=5$

$y_f=(2C/2p)+1=(2*18/6)+1=7$

2 - مولد تيار مستمر ذو اثارة متفرعة مقاومة مجاله 200 Ω يغذى 100 KW عند جهد 500 V وق.د.ك 525 V. احسب مقاومة المنتج وق.د.ك المنتج عند تغدية حمولة 60 KW عند جهد 520 V. [0.123 Ω, 534.5 V]



الحل: $R_f=200\Omega$,

- $P=100KW$, $V=500v$, $E=525v$

$I=P/V=100*1000/500=200A$, $I_f=V/R_f=500/200=2.5\Omega$

$I_a=I+I_f=200+2.5=202.5A$

$E=V+I_a R_a \rightarrow R_a=(E-V)/I_a=0.123\Omega$

- $P=60KW$, $V=520$ v

$I=P/V=60*1000/520=115.4A$, $I_f=V/R_f=2.6\Omega$

$I_a=I+I_f=118A$

$E=V+I_a R_a=534.5v$

3- احسب خطوات اللف (y_b, y_f, y_c) للفائف الموجية البسيطة لمنتج آلة تيار مستمر ذات اربعة اقطاب يضم 13 شقب مزدوجة الطبقة يحتوي كل منها على جانبي ملف وذلك لحالتي اللف المتقدم والرجوعي.
[(7,7,7),(7,5,6)]

4- احسب خطوات اللف (yb, yf, yc) للفائف الموجية البسيطة لمنتج آلة تيار مستمر ذات ستة اقطاب يضم 36 شقب مزدوجة الطبقة يحتوي كل منها على جانبي ملف وذلك لحالتي اللف المتقدم والرجوعي. هل يتطلب اللف استخدام ملفات هامدة وان كان الامر كذلك فما هو العدد المطلوب. [(35c,13,11,12,1dc),(34c,11,11,11,2dc)]

5- آلة تيار مستمر ذات ثمانية اقطاب يضم منتجها 480 موصل مقنن تيار كل منها 100 A. فأذا كانت ق.د.ك الموصل الواحد عند السرعة المقننة 2.2 V، احسب مقنن تيار و ق.د.ك وقدرة الآلة اذا كانت اللفائف: (ا) متراكبة؛ (ب) موجية. [800 A, 132 V, 105.6 KW, 200 A, 528 V, 105.6 KW]

6- آلة تيار مستمر ذات اربعة اقطاب يضم منتجها 564 موصل مقنن تيار كل منها 60 A. فاذا كانت السرعة المقننة للمنتج 800 RPM ومقنن الفيض 0.02 Wb لكل قطب، احسب مقنن تيار و ق.د.ك وقدرة الآلة اذا كانت اللفائف: (ا) متراكبة؛ (ب) موجية. [240 A, 150.4 V, 36.1 KW, 120 A, 300.8 V, 36.1 KW]

7 - مولد تيار مستمر ذو 4 اقطاب يضم منتجه 47 شقب يحمل كل منها ستة موصلات للفائف موجية. فاذا كان مقنن الفيض 25 mW لكل قطب، احسب سرعة المنتج لتوليد ق.د.ك قدرها 250 V.
[1064 RPM]

8- مولد تيار مستمر ذو 4 اقطاب يضم منتجه 144 شقب يحمل كل منها جانبي ملف موجي وكل ملف يتكون من ثلاثة لفات. فاذا كانت

سرعة المنتج 660 RPM، احسب الفيض لكل قطب اللازم لتوليد 520 V. [27.4 mWb]

9- طلب منك لف آلتي تيار مستمر متماثلتين ذات اربعة اقطاب ليدار كل منها بسرعة 1500 RPM ولتنتج الآلة الاولى 120 V وتنتج الثانية 240 V وذلك باستخدام عدد محدد من الملفات الجاهزة احادية اللفة مقنن كل منها 5 A و 4.0 V. اوجد باستخدام نفس عدد الملفات طريقة لف كل آلة وعدد الملفات المطلوبة ومقنن قدرة كل آلة بالكيلوات و عزم كل آلة عند تشغيلها كمحرك. [(lap, 2.4 KW, 15.28 Nm) , (wave, 2.4 KW, 15.28 Nm)]

10- مولد تيار مستمر ذو ثمانية اقطاب مقنناته 300 KW، 500 V ويضم منتجه 768 موصل متصلة في لفائف تراكبية. فاذا تمت ازاحة الفرش ليتقدم محورها عن محور التعادل الهندسي بزاوية قدرها $5 \ e^{o}$، احسب كل من مركبة ق.د.م المضادة للمغنطة ومركبة ق.د.م المتعامدة لكل قطب. [200 At/pole, 3400 At/pole]

11- مولد تيار مستمر ذو اربعة اقطاب يضم منتجه 888 موصل موصلة في لفائف موجية ويغذى تيار قدره 90 A. فاذا تمت ازاحة الفرش ليتقدم محورها عن محور التعادل الهندسي بزاوية قدرها $5 \ m^{o}$، احسب كل من مركبة ق.د.م المضادة للمغنطة ومركبة ق.د.م المتعامدة لكل قطب. واذا كانت لفائف المجال تضم 1200 لفة/قطب احسب تيار المجال الاضافي اللازم لمعادلة المغنطة المضادة. [555 At/pole, 4440 At/pole, 0.4625 A]

12 - مولد تيار مستمر ذو ستة اقطاب واثارة مستقلة يغذي حمولة 96 KW عند 240 V ومقاومة منتجه ذو الفائف المتراكبة $0.03 \ \Omega$ وهو يحتوي على 84 شقب. فاذا كان الفيض 0.03 Wb لكل

قطب وسرعة دوران المنتج 700 RPM، احسب عدد الموصلات فى كل شقب. [9]

13 - آلة تيار مستمر ذات ثمانية اقطاب واثارة منفصلة مقنناتها 450 KW و 500 V ويحتوي منتجها على 640 موصل موصلة في لفائف متراكبة بسيطة. احسب عدد لفات اللفائف البينية ولفائف التعويض اللازمة للآلة ومركبات ق.د.م المضادة والمتعامدة عند ازاحة محورالفرش $5\ e^{o}$. [3.5(4),6.5(6),250At,4250At]

14 - آلة تيار مستمر ذات 4 اقطاب مساحة وجه كل قطب منها 400 cm^2 ويحتوي المنتج على 77 شقب مزدوجة الطبقة ويضم كل ملف 3 لفات. فاذا كانت سرعة الآلة RPM 1000 وكثافة الفيض تحت وجه كل قطب 0.75 T ومقنن تيار ملفات المنتج 100 A، احسب كل من مقنن ق.د.ك وتيار وعزم وقدرة منتج الآلة لحالتي اللف المتراكب واللف الموجي. [(231 V, 400 A, 882.36 Nm, 92.4 KW) , (462 V, 200 A, 882.36 Nm ; 92.4 KW)]

15 - مولد تيار مستمر ذو 4 اقطاب قطر منتجه 25 cm وطوله 25 cm وتغطي اقطاب المجال 75% من مساحة سطح المنتج. يضم المنتج 33 ملف متراكبة موزعة على 33 شقب وبكل ملف 7 لفات. فأذا كان متوسط كثافة الفيض في الثغرة الهوائية 0.75 T لكل قطب، احسب متوسط الفيض لكل قطب وثابت الآلة K_a وق.د.ك المنتج عند سرعة RPM 1000 وعزم وقدرة الآلة اذا كان تيار المنتج 400 A. [27.61 mWb, 73.53, 212.61 V, 812.11 Nm, 85 KW]

16 - مولد تيار مستمر ذو 4 اقطاب ينتج كل قطب 0.070 Wb ويضم منتجه 220 ملف متراكب مقاومة كل ملف 4 mΩ. فأذا كان

المولد يغذي تيار قدره 50 A، عند سرعة 900 RPM، احسب كل من ق.د.ك وعزم المنتج ومقاومة كل مسار للفائف المنتج ومقاومته الكلية وجهد اطرافه. [462 V, 245.1 Nm, 0.22 Ω, 0.055 Ω, 459.25 V]

17 - مولد تيار مستمر ذو اثارة مركبة تفرع- طويل مقنناته 25 KW، 250 V يتطلب عند تشغيله باثارة متفرعة فقط رفع تيار المجال بمقدار 0.3 A عند الحمل التام لجعل الجهد مساويا" لجهد الاحمل. فاذا كانت مقاومة اللفائف المتفرعة والمتوالية 125 Ω ، و 0.07 Ω على الترتيب وعدد لفاتهما لكل قطب 1000 و 10 على الترتيب، احسب ق.د.م وتيار مجال التوالى اللازم للحفاظ على الجهد المقنن عند الحمل التام دون رفع تيار التفرع، ومقاومة المباعد اللازمة. احسب ق.د.م المجال الكلية عند اللاحمل والحمل التام لتثبيت الجهد المقنن. [300 At, 30 A, 0.03 Ω, 2000 At, 2300 At]

18 – مولد تيار مستمر ذو 4 اقطاب مقنناته 27.6 KW و 230 V و 1500 RPM يضم منتجه 294 موصل ملفوفة لف موجي بسيط، احسب الفيض لكل قطب عند السرعة المقننة، والعزم المبدول عند التيار المقنن، والقوة الدافعة المغناطيسية لرد فعل المنتج لكل قطب عند التيار المقنن. [15.65 mWb, 175.7 Nm, 2205 At]

19 - مولد تيار مستمر ذو اثارة مركبة تفرع- قصير يغذى حمولة 5 KW عند جهد 250 V. فاذا كانت مقاومات المنتج ومجال التفرع والتوالى 0.8 Ω و 45 Ω و 0.6 Ω على الترتيب، احسب ق.د.ك المنتج. [282.66 V]

20 - مولد تيار مستمر ذو اثارة مركبة تفرع- قصير مقننه 100 KW وعدد لفات مجال التفرع 2000 لكل قطب. وجد عند اخراج ملف

التوالى ان تثبيت الجهد عند V 460 يتطلب تيار تفرع A 2 عند اللاحمل و A 2.65 عند الحمل الكامل. احسب عدد لفات التوالى لكل قطب واللازمة لتثبيت الجهد عند V 460 بين اللاحمل والحمل الكامل. [6]

21 - يعطي الجدول التالي قيم منحنى اللاحمل عند سرعة ثابتة لمولد تيار مستمر ذو اثارة متفرعة. احسب كل من القيمة الحرجة لمقاومة المجال و ق.د.ك المنتجة عندما تكون مقاومة المجال Ω 160.

تيارالاثارة (A)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
جهداللاحمل (V)	120	240	334	400	444	470

[240Ω, 467 V]

-22 مولدين تيار مستمر ذات اثارة منفصلة A و B مقنن جهد كل منهما V 220 والخاصية الخارجية لكل منهما خطية يعملان على التوازي لتغذية حمولة مشتركة A 60. جهد المولد A يبلغ V 270 عند اللاحمل و V 220 عند حمل A 35 وجهد المولد B يبلغ V 280 عند اللاحمل و V 220 عند حمل A 50، احسب تيار وحمولة كل مولد وجهد الحمولة. [23.6 A, 36.4 A, 236.3 V, 5.577 KW, 8.602 KW]

-23 مولدين تيار مستمر اثارة متفرعة A و B ق.د.ك كل منهما V 220 و V 210 على الترتيب، ومقاومات المنتج والمجال لكل آلة Ω 0.02 و Ω 50 وخاصيتهما الخارجية خطية يعملان متوازيين لتغذية A 800، احسب تيار وحمولة كل مولد وجهد الحمولة. [650 A, 150 A, 206.9 V, 134.5 KW, 31.035 KW]

الفصل الخامس

محركات التيار المستمر

1.5.المقدمة

بينما يمكن تشغيل آلات التيار المستمر كمولدات او محركات، فإن جل آلات التيار المستمر العاملة حاليا" تستخدم كمحركات. وبالرغم من ان المحركات الحثية القفصية (cage induction motors) ذات التيار المتردد تمثل برخصها وبساطة تصنيعها الغالبية العظمى من المحركات المستخدمة في قطاع الصناعة والزراعة، فإن محركات التيار المستمر تملك من الميزات ما يعوضها عن تعقيداتها وتكلفتها الاكبر ويترك لها حيزا" في بعض التطبيقات الصناعية. وتمتاز محركات التيار المستمر بقدرتها على انتاج خصائص متنوعة وعلى نطاق واسع بين العزم والسرعة، اضافة الى امكانية التحكم في سرعتها بدقة وبيسر وبشكل اقتصادي. وتوفر هذه المزايا مكانا" خاصا" لمحركات التيار المستمر في انظمة الجر الكهربائي (electric traction) وانظمة التحريك التي تتطلب تغير السرعة بدقة وعلى نطاق واسع كما في انظمة التحكم الآلي.

2.5- خصائص محركات التيار المستمر

في غالبية التطبيقات يتطلب تقييم اداء المحرك معرفة منحنى العلاقة بين السرعة وتيار المنتج الذي يعرف بخاصية السرعة (speed characteristic)، ومنحنى العلاقة بين العزم وتيار المنتج الذي يعرف بخاصية العزم (torque characteristic)، ومنحنى العلاقة بين العزم والسرعة الذي يعرف بخاصية الحمل (load characteristic)، اضافة الى منحنى المغنطة الذي يعرف احيانا" في حالة المحرك بخاصية اللاحمل (no-load characteristic) ويتم الحصول عليه بتشغيل الآلة كمولد منفصل الاثارة وبنفس الطريقة المتبعة مع المولد. ومن الجدير ان المحركات تصنف تبعا" للطريقة التي يتم بها تغذية دائرة المجال وبنفس الكيفية التي تصنف بها المولدات. وعليه يمكن تلخيص خصائص الانواع المختلفة للمحركات كما يلي:

1.2.5 المحرك المثار على التوازي.

يبين الشكل (1- أ) دائرة محرك توازي موصل بمصدر تيار مستمر ذو جهد ثابت يغذى كل من تيار المنتج وتيار المجال. ولكي يمكن ضبط تيار المجال وتغيره بحرية توصل مقاومة متغيرة تسمى المنظم (regulator) على التوالي مع لفائف المجال. ونظرا" لثبوت جهد المصدر فإن سلوك دائرة المجال سيكون مستقلا" عن دائرة المنتج كما هو الحال في المحرك منفصل الاثارة وهو مايجعل خصائص المحرك منفصل الاثارة مماثلة تماما" لخصائص محرك التوازي. ويمكن من دائرة المحرك التعبير عن المعادلات التي تحكم اداء محرك التوازي في الحالة المستقرة كما يلي:

$$E_a = V - I_a R_{at} \qquad (5.1)$$

$$I = I_a + I_f \qquad (5.2)$$

$$V = I_f R_{ft} \qquad (5.3)$$

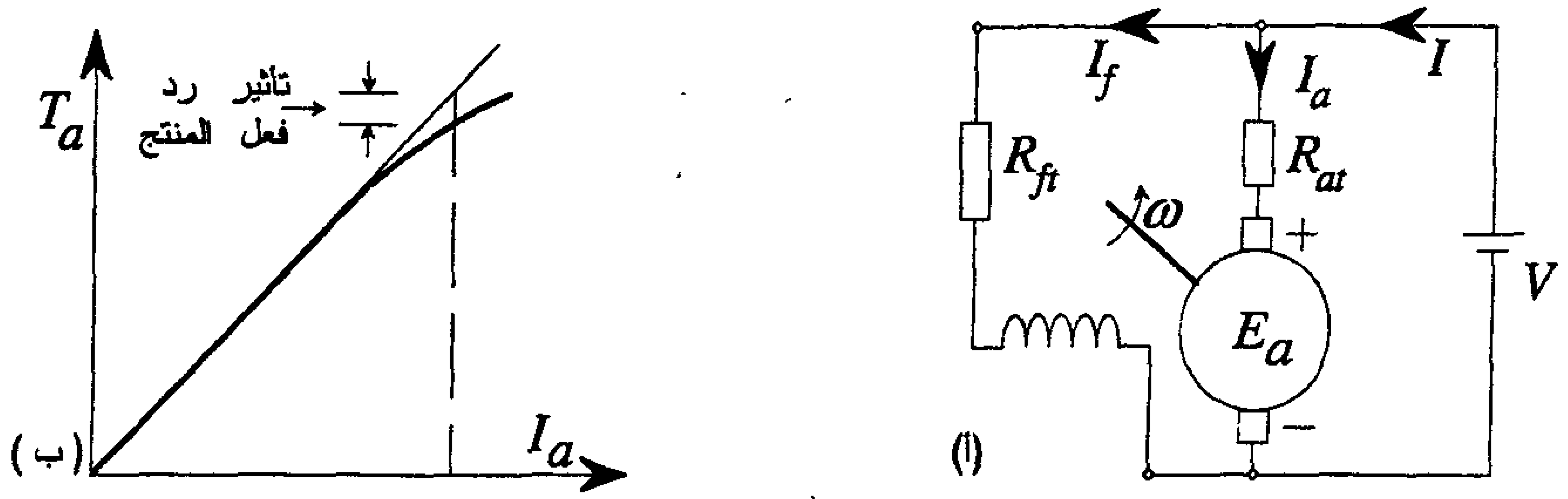
ومن المعادلتين (4.22) و (5.1) والمعادلتين (4.23) و (5.1) يمكن على الترتيب التعبير عن السرعة والعزم كما يلي:

$$\omega = (V - I_a R_{at})/(K_a \Phi) \qquad (5.4)$$

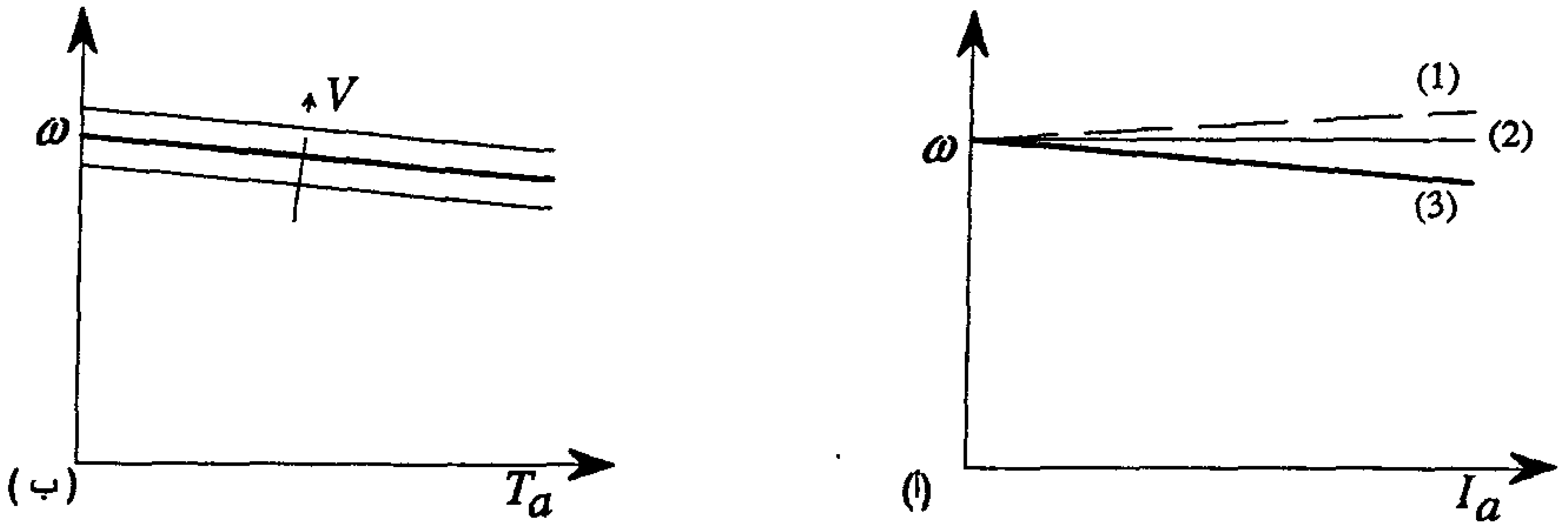
$$T_a = (V - K_a \Phi \omega)/R_{at} \qquad (5.5)$$

وتعطي المعادلة (4.23) العلاقة بين العزم المبدول وتيار المنتج حيث يلاحظ عند ثبوت الفيض ان العزم يزداد خطيا" مع تيار المنتج كما في الشكل (1- ب). وتعطي المعادلة (5.4) خاصية السرعة لمحرك التوازي حيث يلاحظ عند ثبوت تيار المجال (ومن تم الفيض) ان السرعة تتغير خطيا" وبمعدل صغير مع تيار المنتج كما في الشكل (22- أ). ويلاحظ هنا انه بينما تعمل زيادة تيار المنتج على خفض السرعة بزيادة هبوط الجهد $I_a R_{at}$، فهي تعمل في ذات الوقت على رفعها بانقاص الفيض (لزيادة رد فعل المنتج مع

التيار). ولذلك ستزداد السرعة قليلا" مع تيار المنتج عند هيمنة نقصان الفيض (الخط 1)، وتتخفض قليلا" عند هيمنة زيادة هبوط الجهد (الخط 3)، وقد لاتتغير السرعة عند تعادل الاثنان (الخط 2). وفي المقابل تبين المعادلة (5.5) العلاقة بين العزم والسرعة حيث يلاحظ عند ثبوت الفيض ان العزم يزداد خطيا" مع السرعة كما في الشكل (2- ب).



شكل (1) المحرك المثار على التوازي.



شكل (2) تغير السرعة في المحرك المثار على التوازي.

2.2.5 المحرك المثار على التوالي.

يمتلك محرك التوالي ميزات فريدة توفر له مدى واسع من التطبيقات وبقدرات تتفاوت بين آحاد ومئات الكيلوات، اضافة الى تطبيقات المحرك الجامع (universal motor) الذي يمكن تغذيته بالتيار المستمر او بالتيار المتردد. ويبين الشكل (3- أ) دائرة محرك توالي حيث يتدفق نفس التيار في لفائف المنتج ولفائف مجال التوالي وعادة ما يلحق بهما مقاومة متغيرة تسمى

المتحكم (controller) يتم بها التحكم في المحرك. وعند الاخذ في الحسبان ان فيض المجال يتناسب في هذه الحالة مع تيار المنتج يمكن من دائرة المحرك والمعادلتين (4.22) و (4.23) التعبير عن المعادلات التي تحكم اداء محرك التوالي في الحالة المستقرة كما يلي:

$$I_f = I = I_a \tag{5.6}$$

$$K_a\Phi = K_s I_a \tag{5.7}$$

$$E_a = K_s I_a \omega = V - I_a(R_{at}+R_{fs}) \tag{5.8}$$

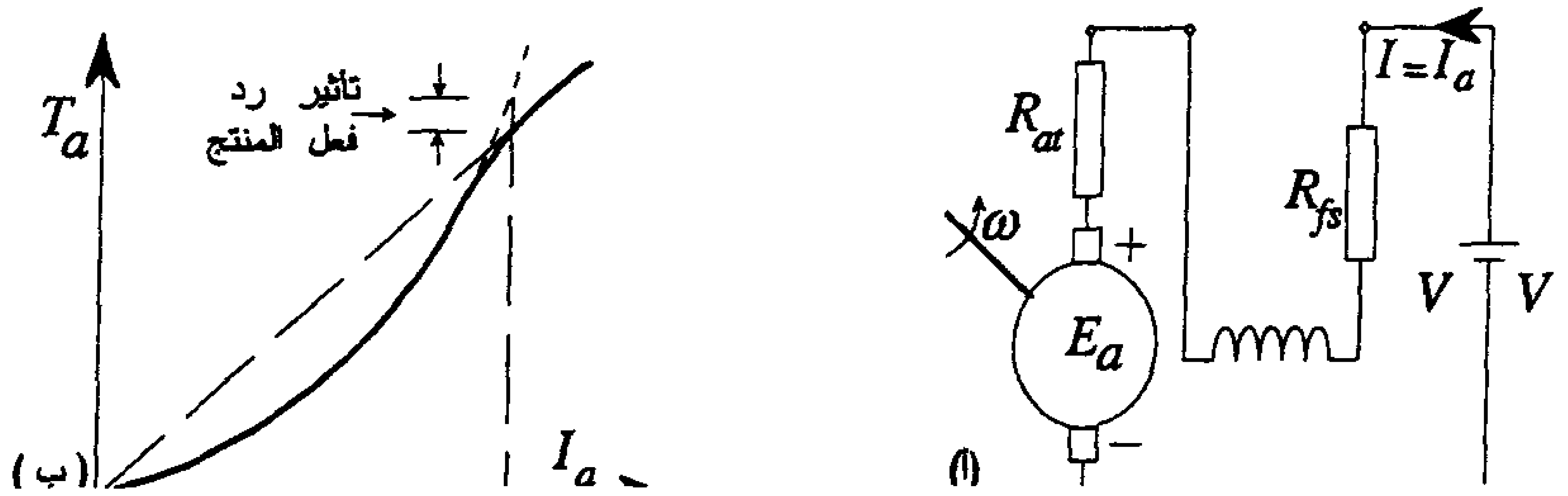
$$T_a = K_s I_a^2 \tag{5.9}$$

ومن المعادلة (5.8)، والمعادلتين (5.8) و (5.9) يمكن على الترتيب التعبير عن السرعة والعزم كما يلي:

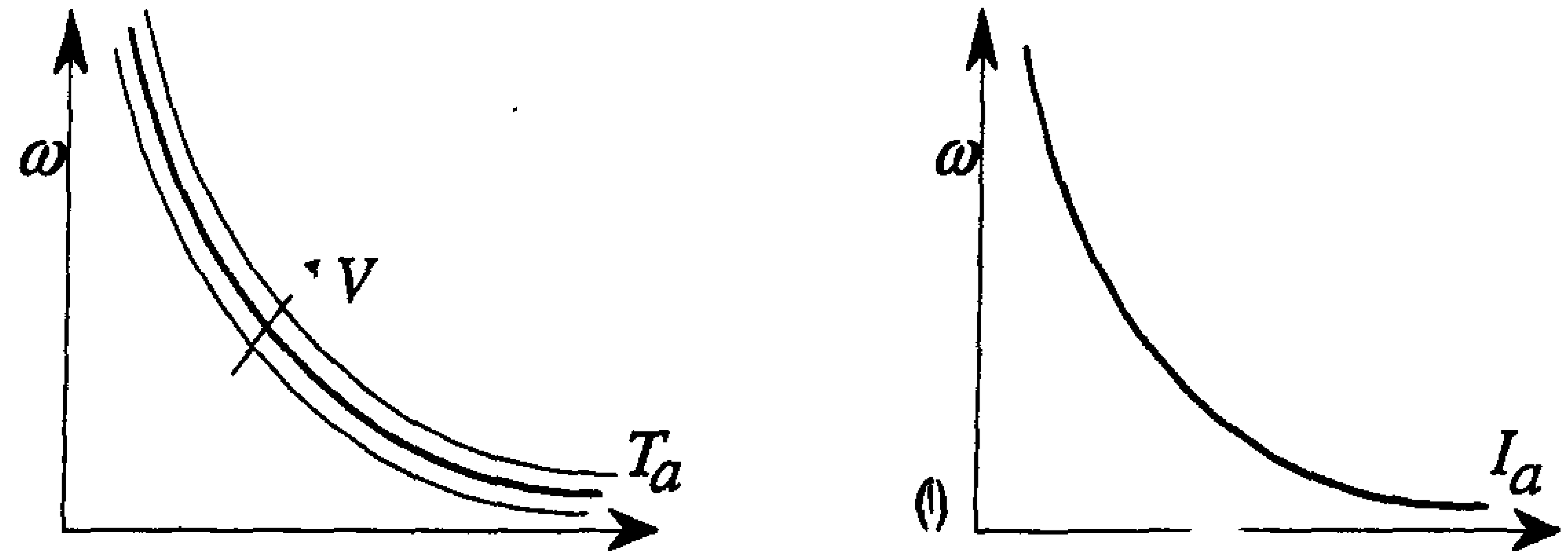
$$\omega = V/(K_s I_a) - (R_{at}+R_{fs})/K_s \tag{5.10}$$

$$T_a = K_s V^2/(K_s\omega+R_{at}+R_{fs})^2 \tag{5.11}$$

وتمثل المعادلة (5.9) خاصية العزم لمحرك التوالي حيث يتناسب العزم طرديا" مع مربع تيار المنتج عند اهمال التشبع كما في الشكل (3- ب). وتعطي المعادلة (5.10) خاصية السرعة لمحرك التوالي حيث يلاحظ ان السرعة تتناسب عكسيا" وبمعدل لاخطي كبير مع تيار المنتج كما في الشكل (4- أ). ويتبين من الشكل (4- أ) انه عند القيم المنخفضة لتيار المنتج (ومن تم الفيض) قد تبلغ سرعة المحرك قيم عالية جدا" يمكن ان تدمر المحرك ذاته. ولذلك لاينبغي مطلقا" تشغيل محرك التوالي بدون حمولة. وفي المقابل تبين المعادلة (5.11) العلاقة بين العزم والسرعة حيث يلاحظ ان العزم يتناسب عكسيا" وبمعدل لاخطي كبير مع السرعة كما في الشكل (4- ب). ولذلك يكون عزم محرك التوالي اكبر ما يمكن عند البدء (السرعة صفر).



شكل (3) المحرك المثار على التوالي.



شكل (4) تغير السرعة في المحرك المثار على التوالي.

3.2.5 المحرك ذو الاثارة المركبة.

تستخدم في المحرك ذو الاثارة المركبة لفائف مجال التوازي والتوالي معا" حيث يمكن ان يكون التوازي طويل او قصيرة. ويمكن توصيل لفائف التوالي لتنتج ق.د.م تعاكس ق.د.م لفائف التوازي حيث يسمى المحرك بالمركب الفرقي، او تدعم ق.د.م لفائف التوازي حيث يسمى المحرك بالمركب الجمعي وتكون خصائصه وسط بين خصائص محرك التوازي ومحرك التوالي. وبما ان السرعة $N\propto(E_a/\Phi)$ تتناسب طرديا" مع E_a وعكسيا" مع Φ يلاحظ في المحرك المركب الفرقي حيث تتناقص كل من E_a و Φ مع زيادة الحمولة ان السرعة قد لاتتغير او تزداد مع الحمل وقد تصبح غير مستقرة وهو مايحد من استعمال هذا المحرك. ويبين الشكل (5- أ) دائرة محرك مركب جمعي طويل التوازي حيث يمكن كتابة معادلات اداء المحرك كما يلي:

$$E_a = V - I_a(R_{at}+R_{fs}) \qquad (5.12)$$

$$\Phi_t = \Phi_f + \Phi_s \qquad (5.13)$$

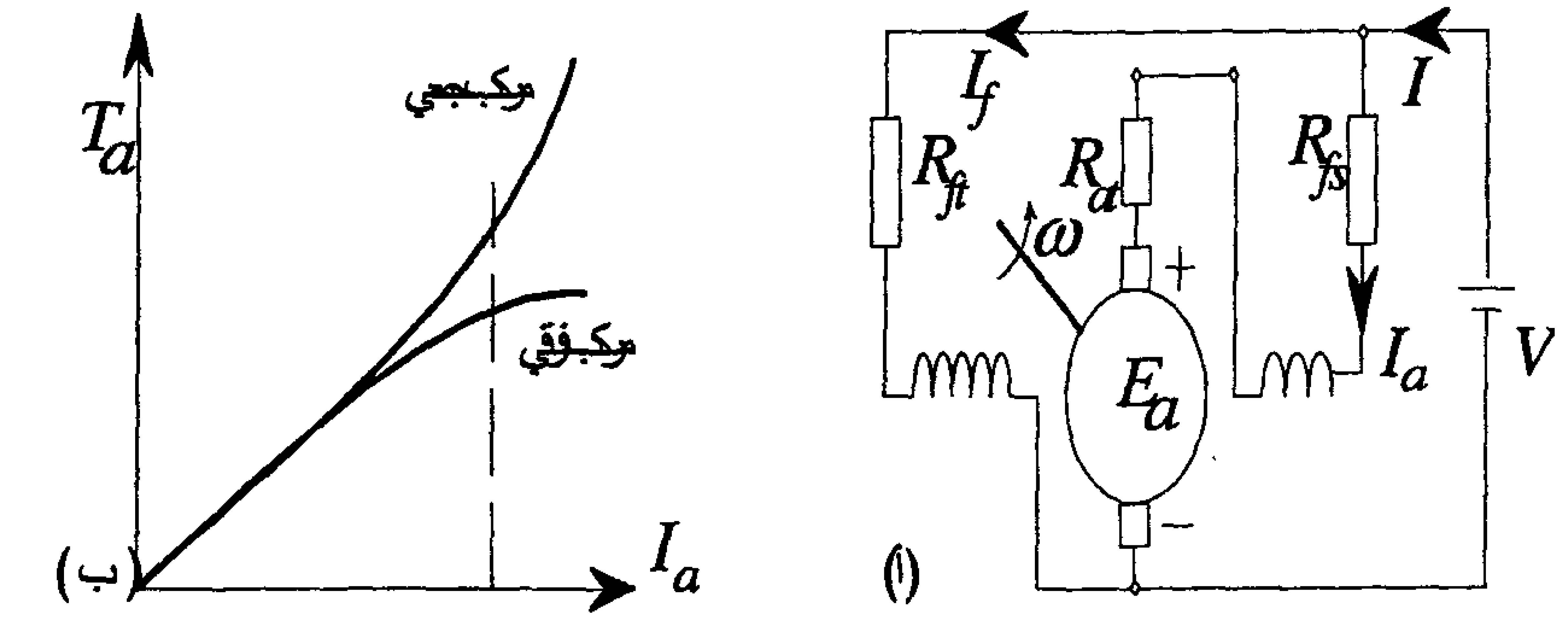
$$T_a = K_a\Phi_t I_a \qquad (5.14)$$

ومـــن المعـــادلتين (4.22) و (5.12) والمعـــادلتين (4.23) و (5.13) يمكن على الترتيب التعبير عن السرعة والعزم كما يلي:

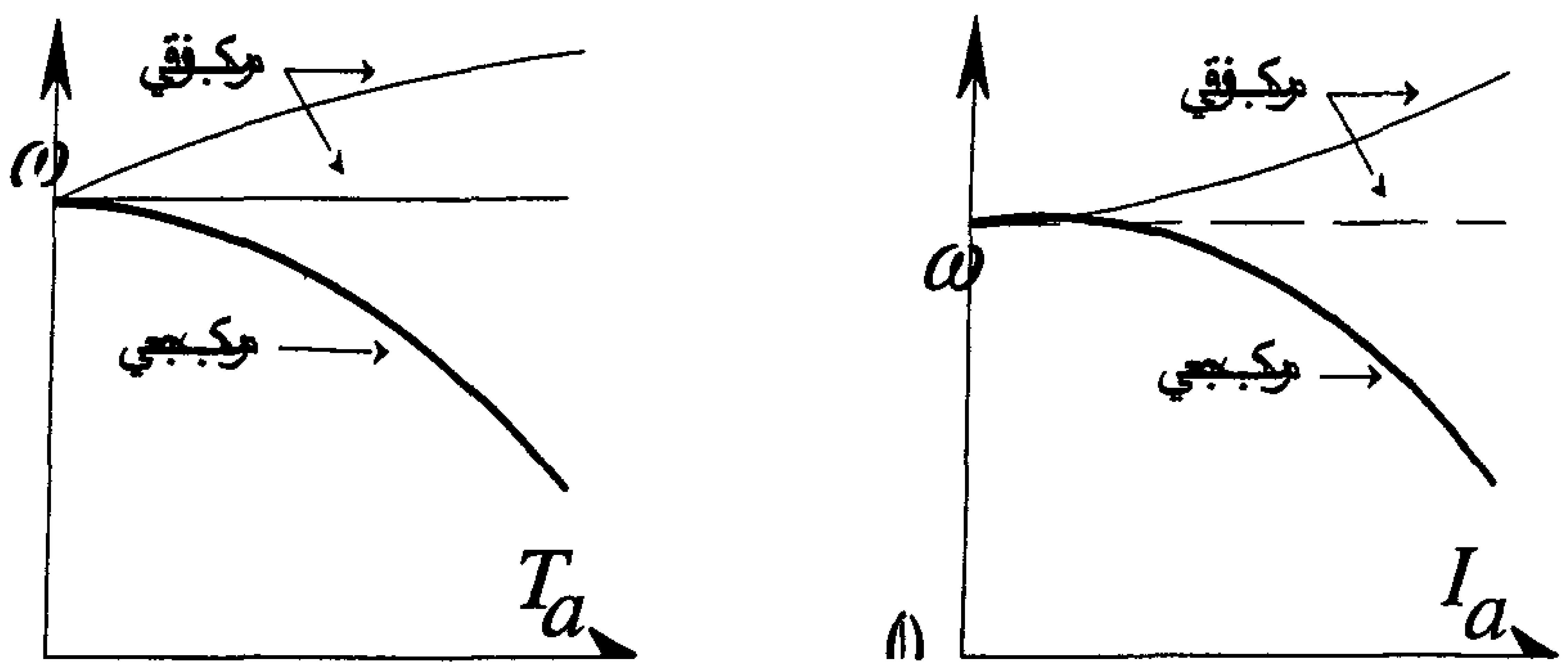
$$\omega = [V-I_a(R_{at}+R_{fs})]/(K_a\Phi_t) \qquad (5.15)$$

$$T_a = (V-K_a\Phi_t\omega)/(R_{at}+R_{fs}) \qquad (5.16)$$

وتعطـي المعادلـة (5.14) خاصـية العـزم للمحـرك المركـب الجمعـي كمـا هـو مبين في الشـكل (5- ب)، بينمـا تعطـي المعادلـة (5.15) خاصـية السرعة للمحـرك المركـب الجمعي كمـا هـو مبين في الشـكل (6- أ). وفي المقابل تـبين المعادلـة (5.16) العلاقـة بـين العـزم والسـرعة كمـا هـو مـبين في الشـكل (6- ب). ويلاحظ في المحرك المركب الجمعي انه مع زيادة الحمولة يـزداد تيـار المنـتج ويـزداد العـزم لاخطيـا" بشـكل يفـوق عـزم محـرك التـوازي بسبب فيض لفائف التوالي وتنخفض السـرعة بنفس النمط ولنفس السبب.



شكل (5) المحرك ذو الاثارة المركبة.



شكل (6) تغير السرعة في المحرك ذو الاثارة المركبة.

3.5 بدء حركة المحرك.

يمكن التعبير من المعادلة (5.1) عن تيار المنتج للمحرك المثار على التوازي او المحرك منفصل الاثارة كما يلي:

$$I_a = (V_a - E_a)/R_a \qquad (5.17)$$

ومن الواضح انه في لحظة توصيل المحرك بالمصدر المغذي له ستكون ق.د.ك الخلفية E_a المحتثة في منتج المحرك صفرا". وبفرض ثبوت جهد المصدر V_a كما هي العادة، يكون تيار البداء (starting current) للمحرك كما يلي:

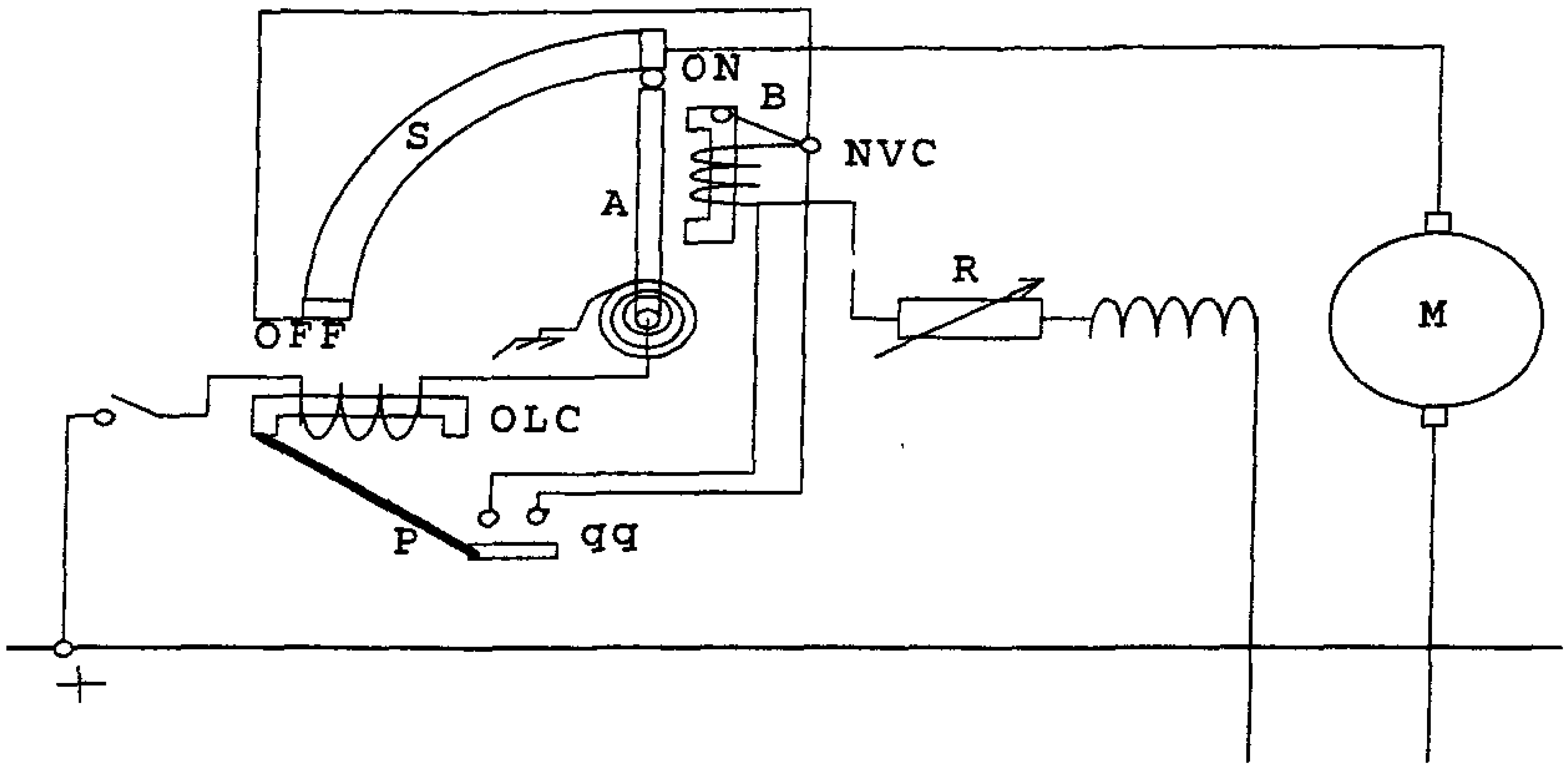
$$I_{ao} = V_a/R_a \qquad (5.18)$$

ونظرا لأن مقاومة المنتج عادة ما تكون صغيرة وكذلك الفرق بين V_a و E_a عند الحمل المقنن يتضح من المعادلتين (5.17) و (5.18) ان تيار البدء سيكون اكبر بكثير من التيار المقنن بنسبة قد تصل الى عشرة اضعاف مما يعرض لفائف المنتج الى خطر التلف والحريق. وعليه يجب الحد من قيمة تيار البدء في المحركات (باستثناء المحركات الصغيرة جدا) للحفاظ على سلامتها. ويمكن تحقيق ذلك بادخال مقاومة متغيرة تسمى ببادئ الحركة (starter) على التوالي مع المنتج وتضبط لتكون ذات قيمة

كبيرة فى لحظة البدء ثم تخفض تدريجيا الى الصفر مع ارتفاع سرعة دوران المنتج كما هو مبين فى الشكل (7) الذى يعرض نموذج لبادئ حركة يحقق بعض متطلبات الحماية كذلك.

فعند البدء ينقل الذراع A الذى يرتكز على المحور O يدويا وبالتدريج من موضع التوقف OFF بما يسمح بارتفاع سرعة المحرك تدريجيا الى ان يصل الدراع موضع التشغيل ON حيث تصبح لفائف المحرك متصلة مباشرة بالمصدر وتخرج مقاومة البدء S كليا من مسار التغدية. ويثبت الدراع A على الموضع ON ضد فعل النابض المحورى C بواسطة مغناطيس كهربائى يمده بالطاقة ملف اللاجهد NVC الموصل على التوالى مع لفائف المجال للمحرك. فعند انقطاع التغدية لاى سبب يفقد الملف NVC طاقته ويعاد الدراع A الى الموضع OFF بواسطة النابض المحورى وبما يضمن عدم تشغيل المحرك لاحقا دون دخول المقاومة S فى دائرته.

وتمكن الوصلة B تيار المجال من اجتياز المقاومة S عندما يكون الدراع A فى الموضع ON حيث يتدفق تيار المجال عندها من المصدر خلال الدراع A ولب المغناطيس الكهربى والملف NVC الى مقاومة المجال المتغيرة R. ويحمى ملف الحمل المفرط OLC المحرك ضد التيار المرتفع الناتج عن تجاوز الحمل المقنن. فعند ما يتجاوز التيار حد معين يقوم المغناطيس الكهربى OLC بجدب الدراع P لتوصيل النقطتين qq معا وبالتالى يتم قصر الملف NVC الذى يفقد طاقته ويترك الدراع A ليعود الى الموضع OFF. ولايقاف المحرك عمدا يجب فتح المفتاح الرئيسى.



شكل (7) بدء حركة محرك التيار المستمر.

4.5 التحكم فى المحرك واستخدامته.

يمتاز محرا· التيار المستمر بسهولة التحكم (control) فى سرعته بشكل كفؤ. ولذلك فهو شائع الاستعمال فى نظم التحريك متغيرة السرعة (variable speed drive systems) حيث يتطلب الامر تغير السرعة بشكل دقيق. وعادة ما يتم في الحياة العملية الحصول على مغذيات تيار مستمر متغيرة باستخدام دوائر التقويم الالكترونية. ويمكن من المعادلتين (4.22) و (5.1) التعبير عن سرعة المحرك بالدورة في الدقيقة كما يلى:

$$N = K_e E_a/\Phi = K_e(V_a - I_a R_a)/\Phi \qquad (5.19)$$

$$k_e = 60a/(2pZ)$$

ويتضح من المعادلة (5.19) ان السرعة تتناسب طرديا مع ق.د.ك المنتج وجهد الاطراف وعكسيا مع مقاومة المنتج وفيض المجال، ولذلك يمكن بصفة عامة التحكم فى سرعة المحرك بتغيير ثلاثة عوامل هى: (أ) تغيير مقاومة المنتج ويسمى ذلك بتحكم المنتج (armature control)؛ (ب) تغيير فيض المجال ويسمى ذلك بتحكم المجال (field contrtol)؛ (ج) تغيير جهد الاطراف ويسمى ذلك بتحكم الجهد (voltage control).

وهكذا يمكن التحكم فى سرعة المحرك المثار على التوازى او المحرك ذو الاثارة المستقلة بواحدة من الطرق التالية:

1 - تغيير المقاومة الفعالة لدائرة المنتج بواسطة مقاومة متغيرة تدخل على التوالى مع المنتج تسمى بالمتحكم (controller). وتمكن هذه الطريقة من تغيير السرعة من قرابة الصفر الى قيمتها المقننه. ومن اهم عيوب هذه الطريقة انها تؤدى الى هدر كبير للطاقة فى المقاومة المتغيرة التى يجب ان تحمل تيار المنتج كاملا، وتؤدى كذلك الى رداءة تنظيم السرعة (speed regulation) نتيجة لهبوط الجهد فى المقاومة المتغيرة ومايترتب عليه من تغير السرعة بشكل كبير مع الحمل. ولذلك تعتبر هذه الطريقة غير عملية فى الغالب ولاتستخدم الا عندما تكون الكفاءة ليست ذات اهمية كبرى.

2 - تغيير فيض المجال عن طريق تغيير تيار المجال بواسطة مقاومة متغيرة تسمى منظم المجال (field regulator) تدخل على التوالى مع دائرة المجال وذلك بفرض ثبوث جهد المجال كما هو الحال فى المحرك ذو الاثارة المتوازية او المركبة. ويمكن بهذه الطريقة رفع سرعة المحرك الى ثلاثة اضعاف قيمتها المقننة ولكن لايمكن تخفيضها عن القيمة المقننة. ويعيب هذه الطريقة ان اضعاف المجال لغرض زيادة السرعة سيضعف من عزم المحرك الذى يتناسب طرديا مع الفيض كما يتضح ذلك من المعادلة (4.23).

3 - تغيير الجهد المطبق على المنتج مع ثبوت جهد الاثارة. وتمكن هذه الطريقة من تغيير السرعة من قرابة الصفر الى السرعة المقننة دون تغير عزم المحرك. وتعتبر منظومة وورد- ليونارد (Ward-Leonard) المبينة فى الشكل (28) احدى تطبيقات هذه الطريقة حيث يستخدم مولد G ذو اثارة مستقلة يدار بمحرك خاص لانتاج جهد متغير. ويتم

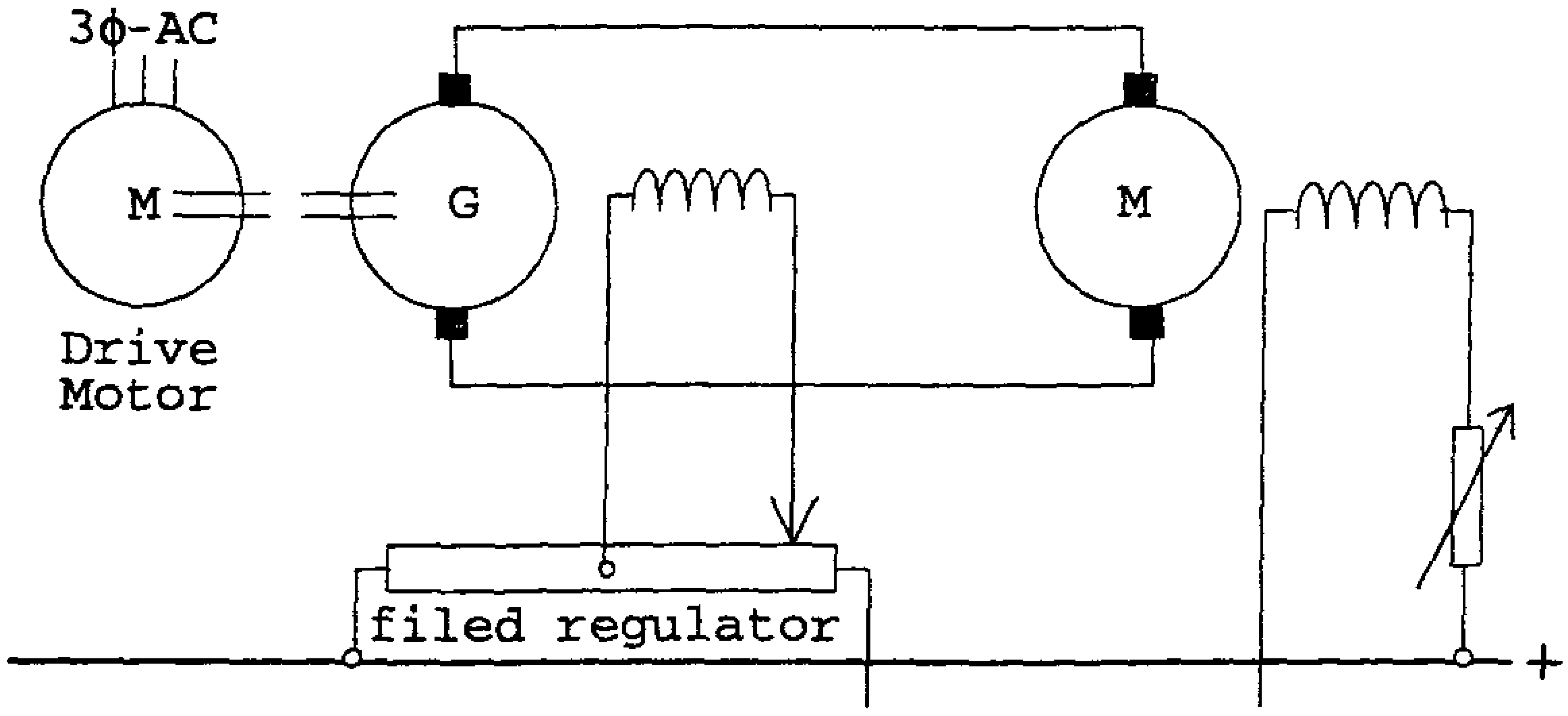
التحكم فى السرعة وكذلك قلب اتجاهها عن طريق تغيير قيمة وقطبية تيار مجال المولد (بواسطة مقاومة متغيرة) وبالتالى تغيير مقدار وقطبية الجهد المطبق على منتج المحرك M بسهولة وباقل فقد للطاقة.

ويكمن البديل الاحدث لمنظومة وورد- ليونارد المكلفة فى الحصول على الجهد المتغيير باستخدام المقومات (rectifiers) والثايرستورات (thyristors) الالكترونية لتحويل التيار المتردد الى تيار مستمر حيث يبين الشكل (29) نمودج للنظم الالكترونية الساكنة الممكن استخدامها للتحكم في سرعة محرك التيار المستمر.

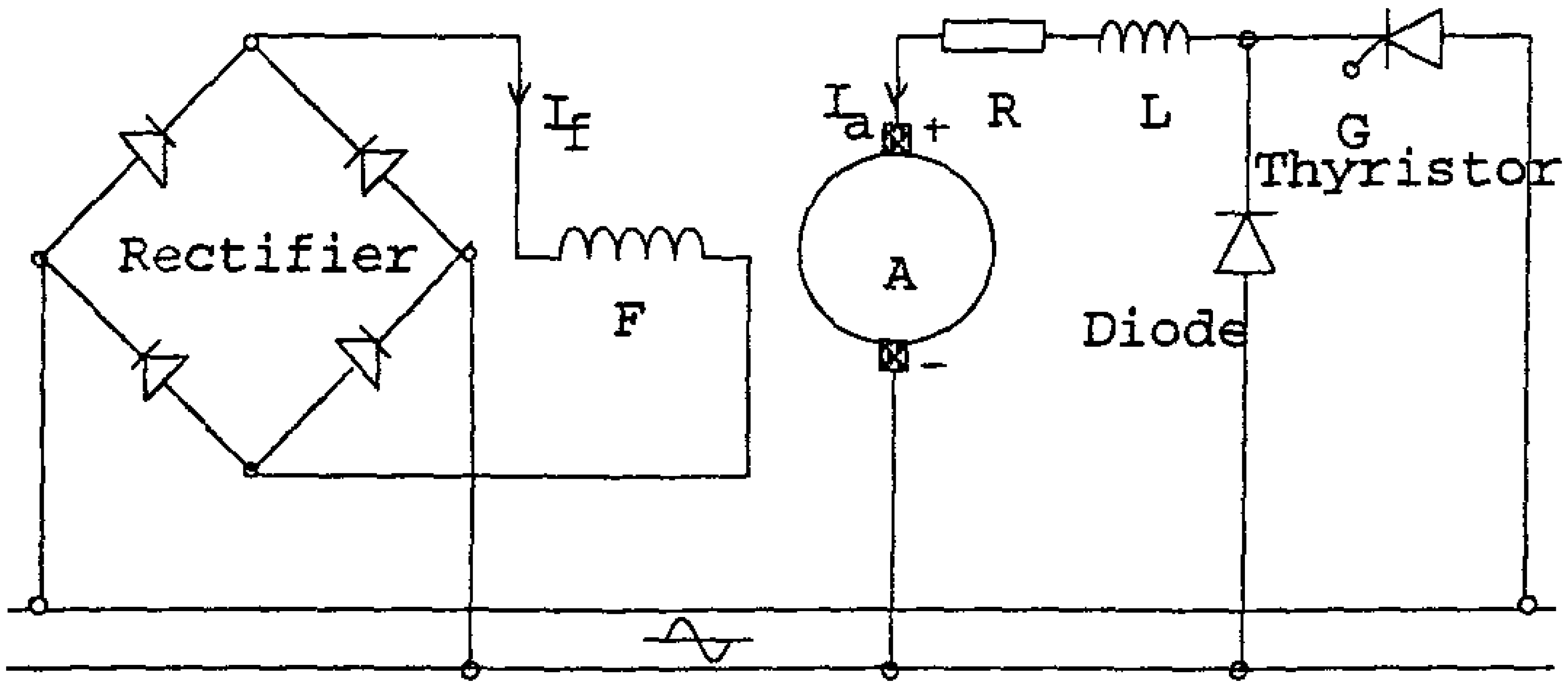
اما فى حالة المحرك المثار على التوالى فإن الطرق السابقة لاتعتبر ذات جدوى عملية للتحكم فى سرعة المحرك لانه لايمكنها تغيير معاملات دائرة المنتج دون تغيير معاملات دائرة المجال والعكس صحيح. **وتقوم الطرق العملية المستخدمة فى التحكم فى سرعة محرك التوالى على تغيير الفيض بواحدة من الطرق التالية:**

1 - استخدام ملفات مجال تحتوى على عدة نقاط توصيل (taps) مما يمكن من تغيير عدد لفات المجال ومن تم الفيض مباشرة. ومن الواضح ان مثل هذه الملفات ستكون مكلفة.

2 - استخدام مقاومة متغيرة تسمى المباعد (divertor) على التوازى مع ملف المجال لتغيير السرعة من قرابة الصفر الى السرعة المقننة. وبتغيير مقاومة المباعد يمكن تغيير تيار المجال ومن تم تغيير الفيض. وفى بعض الاحيان يتم توصيل المباعد على التوازى مع دائرة المنتج للتحكم فى سرعة المحرك بتغيير تيار المنتج.



شكل (8) منظومة وورد- ليونارد للتحكم فى السرعة.



شكل (29) منظومة الكترونية للتحكم فى السرعة.

وعند اهمال التشبع المغناطيسى نجد ان فيض المجال يتناسب طرديا مع تيار المجال ($\Phi \propto I_f$). ولذلك يمكن التعبير من المعادلة (4.23) عن العلاقة بين عزم المحرك وكل من تيار المنتج وتيار المجال كما يلي:

$$T = K_a \Phi I_a = K_t I_f I_a \qquad (5.20)$$

$$K_a = 2pZ/(2\pi a),\ \ \Phi = K_f I_f\ ,\ \ K_t = K_a K_f$$

وعليه فإن العزم يتناسب مع تيار المنتج عند ثبوت تيار المجال كما فى المحرك ذو الاثارة المنفصلة او المتوازية بينما يتناسب العزم مع مربع تيار المنتج فى المحرك ذو الاثارة المتوالية. وعليه يمكن تلخيص تطبيقات الانواع المختلفة للمحرك كما يلى:

1 - يميز المحرك ذو الاثارة المنفصلة او المتوازية بعدم تغير سرعته بشكل كبير معالحمل وسهولة التحكم فى سرعته. ولذلك فهو يستخدم فى الحالات التى تتطلب سرعة ثابتة ولاتحتاج الى عزم بدء كبير كما فى المراوح والنافخات ومضخات الطرد المركزى وآلات القطع.

2 - تمتاز المحركات المثارة على التوالى بكبر عزم البدء وتغير السرعة بشكل كبير مع الحمل. ولذلك فهى تستخدم فى الحالات التى تتطلب عزم بدء كبير كما فى آلات الجر والروافع والقاطرات والحافلات الكهربائية.

3 - تمتاز المحركات ذات الاثارة المركبة بكبر عزم البدء وقلة تغير السرعة مع الحمل الكامل. ولذلك فهى تستخدم فى الحالات التى تتطلب عزم بدء كبير مع ثبوت السرعة كما فى المصاعد والمدلفنات.

5.5 الفقودات والكفائة.

يمكن تصنيف مفقودات (losses) آلة التيار المستمر تبعا للعضو المرتبطة به وطبقا لطبيعة تلك المفقودات الى ما يلى:

1 - مفاقيد العضو المنتج (ذو التيار المتردد فى موصلاته) وهى تنقسم الى نوعين (كما هو الحال فى المحول) هى:

أ - الفقد الاومي فى مقاومة المنتج ويتناسب مع مربع تيار المنتج.

ب - فقد لب المنتج ويتكون من فقد التخلف المغناطيسى الذى يتناسب مع التردد وتقريبيا" مع مربع الفيض؛ وفقد التيار الدوامى الذى يتناسب مع مربع كل من التردد والفيض.

2 - مفاقيد المجال ويمكن تقسيمها الى نوعين كما يلي:

أ - الفقد الاومى فى مقاومة ملف التوازى (ان وجد) ويعتبر ثابتا عند ثبوت جهد المصدر.

ب - الفقد الاومى فى مقاومة كل من ملف التوالى للمجال وملفات اقطاب التبديل وملفات التعويض (ان وجدت) وتتناسب جميعها مع مربع تيار المنتج.

3 - مفاقيد المبدل ويمكن تقسيمها الى نوعين كما يلي:

أ - الفقد الاومى فى مقاومة الاتصال بين الفرش وقطع المبدل وهو يعتمد على نوع وحالة الفرش ويتناسب مع تيار المنتج.

ب - فقد الاحتكاك بين الفرش والمبدل ويعتمد على ضغط الفرش ومعامل الاحتكاك وسرعة دوران المنتج.

4 - مفاقيد المنتج الميكانيكية ويمكن تقسيمها الى نوعين كما يلى:

أ - فقد الاحتكاك فى كراسى التحميل ويتناسب تقريبيا مع السرعة.

ب - فقد اضطراب الهواء ويتناسب مع مكعب السرعة وعادة ما يهمل الا اذا كانت الآلة تحتوى على مراوح تبريد.

ولتسهيل حساب الكفاءة فى حالة الاستقرار وثبوت السرعة تقسم المفاقيد الى مفاقيد نحاسية واخرى دورانية كما يلى:

1 - المفاقيد النحاسية P_c وتشمل الفقد الاومى فى المقاومة المكافئة لدائرة المنتج R_e (وهى مجموع مقاومات كل من المنتج ودائرة التوالى ولفائف اقطاب التعديل ولفائف التعويض واتصال الفرش) اضافة الى الفقد الاومى فى دائرة التوازى. وكل هذه المفاقيد تتغير مع الحمل ماعدا فقد دائرة التوازى الذى يعتمد على جهد التوازى للمجال وهو ثابت.

2 - المفاقيد الدورانية P_r وتتمثل فى المفقودات التى تنتج عن دوران المنتج ولاتتغير مع الحمل عند ثبوث السرعة وهى تشتمل على جميع مفقودات الاحتكاك واظطراب الهواء اضافة الى مفقودات لب المنتج.

واذا كـان تيـار الحمولـة I والجهـد بـين اطرافهـا V وتيـار المنـتج I_a يمكن حساب كفاءة المولد عند ثبوت السرعة كما يلى:

$$\eta = P_{out}/P_{in} = P_{out}/(P_{out}+P_{loss}) \qquad (5.21)$$

$$P_{out} = VI \qquad (5.22)$$

$$Ploss = P_c + P_r = I_a^2 R_e + V_f I_f + P_r \qquad (5.23)$$

$$\eta\ I + VI)/VI = _a^2 R_e + V_f I_f + P_r) \qquad (5.24)$$

واذا كـان جهـد المصـدر V والتيـار المسـحوب منـه I وتيـار المنـتج I_a يمكن حساب كفاءة المحرك عند ثبوت السرعة كما يلى:

$$\eta = P_{out}/P_{in} = (P_{in}-P_{loss})/P_{in} \qquad (5.25)$$

$$P_{in} = VI \qquad (5.26)$$

$$Ploss = P_c + P_r = I_a^2 R_e + V_f I_f + P_r \qquad (5.27)$$

$$\eta = [VI - (I_a^2 R_e + V_f I_f + P_r)]/VI \qquad (5.28)$$

وباهمـال تيـار دائـرة المجـال المتوازيـة مقارنـة بتيـار المنـتج وبفـرض ان المفقودات الدورانية والثابتة لاتتغير مع الحمولة يمكن الحصول على الكفاءة القصـوى التقريبيـة للمولـد بتقسـيم بسـط ومقـام المعادلـة (5.24) علـى I (مـع ملاحظة ان $I=I_a$) ثم مساوات تفاضل المقام بالصفر لنجد ان:

$$(d/dI)(V + IR_e + V_f I_f/I + P_r/I) = 0 \qquad (5.29)$$

$$R_e - V_f I_f/I^2 - P_r/I^2) = 0 \qquad (5.30)$$

$$I^2 R_e = V_f I_f + P_r \qquad (5.31)$$

اى ان الكفـاءة القصـوى للمولـد تحـدث عنـدما تكـون المفقـودات المتغيرة مساوية للمفقودات الثابتة. وبالمثل يمكن الحصـول علـى نفس النتيجة

للمحرك من المعادلة (5.28). ويمكن الحصول على القدرة الميكانيكية الكلية P_a الداخلة الى المولد او الخارجة من المحرك والتى يمثلها العزم الكلى T_a كما يلى:

$$P_a = E_a I_a = \omega T_a \qquad (5.32)$$

وهذه القدرة تشمل كل من صافى القدرة P_m المنقولة بين المنتج وعمود الادارة والتى تحول من او الى قدرة كهربائية ويمثلها صافى العزم T_m المبدول على او الناتج عن العمود بالاضافة الى المفاقيد الدورانية P_r حيث نجد ان:

$$P_a = P_m + P_r \qquad (5.33)$$

$$\omega T_a = \omega T_m + P_r \qquad (5.34)$$

أمثلة محلولة:

1 - محرك تيار مستمر ذو اثارة منفصلة يضم عضو مجاله 4 اقطاب ويضم منتجه 888 موصل ملفوفة في هيئة لفائف موجية ومقاومة منتجه 0.28 Ω ويسحب 50 A عند تغذيته من مصدر 440 V. فاذا كان فيض التغرة الهوائية 0.023 Wb لكل قطب، احسب سرعة المحرك.
[625.7 RPM]

الحل :

2p=4 , Z=888 ,a=2 ,Ra=0.28Ω ,I=50A ,V=440v ,ϕ=0.023 Wb

N=?

$E= V-IR_a= 440-50*0.28=426$ v

$E=2PN\phi Z/60a \rightarrow N=60aE/2P\phi Z =625.7$ RPM

2 - محرك تيار مستمر ذو اثارة منفصلة يضم عضو مجاله 4 اقطاب يدور بسرعة 900 RPM عند تغذيته من مصدر جهده 460 V. احسب

تقريبيا سرعة دوران المحرك عند تغذيته من مصدر جهده V 200.
افترض ان فيض التغرة الهوائية سينخفض الى 70% من قيمته الاصليه. [559 RPM]

3 - محرك تيار مستمر ذو اثارة منفصلة يضم عضو مجاله 6 اقطاب ويضم منتجه 432 ملف ذات لف متراكب بسيط ومقاومة منتجه Ω 0.2 ويسحب تيار A 110 من مصدر جهده V 480. فاذا كان الفيض Wb 0.05 لكل قطب، احسب سرعة وعزم المحرك. [636.1 RPM, 756.3 NM]

4 - محرك تيار مستمر ذو اثارة متوالية مقاومة منتجه Ω 0.12 يسحب A 110 من مصدر V 230 عند سرعة RPM 600. فاذا كانت مقاومة المجال Ω 0.03، احسب سرعة المحرك عند انخفاض التيار الى A 50. افترض ان الفيض لكل قطب Wb 0.024 عند A 110 و Wb 0.0155 عند A 50. [968.2 RPM]

5 - محرك تيار مستمر ذو اثارة متفرعة مقاومة مجاله Ω 240 يغدى بجهد V 440 ليدور بسرعة RPM 700 عند اللاحمل. احسب مقاومة المجال الاضافية اللازمة لرفع سرعة اللاحمل الى RPM 1000 اذا كانت قيم منحنى اللاحمل كما يلي:

تيار الاثارة (A)	0.05	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
الفيض/ قطب (mWb)	6.00	8.00	9.40	10.2	10.8	11.2	11.2

[355 Ω]

6 - محرك تيار مستمر ذو اثارة متفرعة مقاومة دائرة منتجه Ω 0.40 يسحب تيار A 30 من مصدر جهده V 230 عند سرعة 900 RPM. احسب مقاومة دائرة المجال الاضافية المطلوبة لخفض سرعة المحرك الى 600 RPM. افترض ان تيارالمنتج سينخفض الى الثلثين نتيجة لخفض

السرعة.[3.833Ω]

7 - محرك تيار مستمر ذو اثارة متوالية مجموع مقاومتي منتجه ومجاله المتوالي 0.2 Ω يسحب تيار 50 A من مصدر جهده 440 V عند سرعة 600 RPM. احسب مقاومة دائرة المنتج الاضافية المطلوبة لخفض سرعة المحرك الى 400 RPM. افترض ان العزم الكلى للمحرك سينخفض الى النصف. [6.51 Ω]

8 - محرك تيار مستمر ذو اثارة متفرعة مقاومة منتجه 0.50 Ω يسحب 20 A من مصدر 230 V عند السرعة المقننة. احسب مقاومة دائرة المنتج الاضافية اللازمة لخفض السرعة الى النصف اذا كان عزم الحمولة: (أ) ثابت؛ (ب) يتناسب خطيا" مع السرعة؛ (ج) يتناسب مع مربع السرعة. [5.5 Ω, 11.5 Ω, 23.5 Ω]

9 - محرك تيار مستمر اثارة متوالية مقنناته 5.5 KW، 220 V، 300 RPM يدير مروحة يتناسب العزم اللازم لادارتها مع مربع السرعة وكانت مقاومات المنتج ومجال التوالى 0.6 Ω و 0.4 Ω على الترتيب، احسب القدرة والعزم الذى يبذله المحرك عند السرعة المقننة وعند سرعة 200 RPM. كذلك احسب المقاومة المطلوبه على التوالى مع المنتج لخفض السرعة الى 200 RPM. [4.875 KW,155.176 Nm, 1.444 KW, 68.967 Nm,7 Ω]

10- محرك تيار مستمر ذو اثارة متفرعة مقنناته 23.8 KW، 400 V ومقاومة منتجه 0.2 Ω ومجاله 267 Ω يسحب عند اللاحمل 3.5 A يؤدي رد فعل المنتج لخفض الفيض بنسبة 2٪ بين اللاحمل والحمل الكامل وهبوط الجهد في مقاومة اتصال الفرش 2 V. احسب نسبة سرعة الحمل الكامل لسرعة اللاحمل عند تغير الفيض وعند ثبوته، والمقاومة اللازمة على التوالي مع المنتج لخفض سرعة الحمل الكامل للنصف مع تبوث العزم. [99 %, 97%, 3.33 Ω]

الفصل السادس

الآلات الحثية ثلاثية الطور

الآلات الحثية ثلاثية الطور

1.6. مقدمة.

تنقسم آلات التيار المتردد مثلها مثل آلات التيار المستمر الى مولدات تستخدم لتحويل الطاقة الميكانيكية الى طاقة كهربائية ومحركات تستخدم لتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية. وتتم عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة من خلال المجال المغناطيسي للآلة الذي يمثل وسط الاقتران بين النظام الكهربائي للآلة والذي يمثل الجهد والتيار معاملاته الاساسية والنظام الميكانيكي للآلة الذي يمثل العزم والسرعة معاملاته الاساسية المناظرة. وتعود عملية التحويل الكهروميكانيكي للطاقة في الآلة اساساً الى كل من ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي التي تتمثل في احتثاث ق.د.ك في الموصل عند تحركه في مجال مغناطيسي، وظاهرة القوى الكهرومغناطيسية التي يتعرض لها الموصل الحامل للتيار نتيجة لوجوده في مجال مغناطيسي.

وكما هو معتاد في الآلات الدوارة في الحياة العملية عادة ما يمثل العضو الساكن (stator) لآلات التيار المتردد الاطار الخارجي للآلة بينما يمثل العضو الدوار (rotor) الجزء الداخلي المتحرك للآلة. وتختلف آلات التيار المتردد عن آلات التيار المستمر في كونها تنتج أو تسحب تيار متردد عند اطراف لفائف الانتاج الرئيسية. وغالباً ما يحتوى المحيط الداخلي للعضو الساكن لآلة التيار المتردد على لفائف المنتج التي ينتج فيها الجهد أو العزم ويسمى بالمنتج (armature)، بينما يحتوى العضو الدوار على لفائف المجال التي تغذى بطرق مختلفة لتنتج المجال المغناطيسي الرئيسي للآلة ويسمى بعضو المجال (field)، وهذا عكس ما عليه الحال في آلات التيار المستمر في الغالب.

وقد تكون آلات التيار المتردد احادية أو ثنائية أو ثلاثية الطور طبقاً لطبيعة ونوع لفائف منتج الآلة. وتجد الآلات ثلاثية الطور تطبيقاتها الواسعة في المنشآت الصناعية الكبيرة حيث تستخدم كمولدات ومحركات، وفي المقابل غالباً ما تستخدم الآلات ثنائية الطور كمحركات لضبط المواقع في منظومات التحكم الذاتي. اما الآلات احادية الطور فغالباً ما تكون محركات يتم استخدامها في المنازل والصناعة كمحركات اولية للعديد من الاجهزة الخفيفة مثل المراوح والنافخات والمضخات المنزلية. وتصنف آلات التيار المتردد اساساً الى نوعين اساسيين وهما الآلات الحثية والآلات التزامنية كما يلي:

1 - الآلات الحثية (induction machines): ويتم فيها اثارة لفائف المجال بواسطة ق.د.ك المحتثة فيها نتيجة لوجودها في المجال المغناطيسي الدوار الناتج عن تدفق التيار المتردد في لفائف المنتج كما يحدث في عمل المحولات، والى ذلك تعود تسميتها بالآلات الحثية. وتتميز الآلات الحثية عن غيرها من الآلات الكهربائية الدوارة في كون عضويها الساكن والدوار يحملان تياراً متردداً حيث تكون سرعة دوران الدوار اقل من سرعة التزامن كما يكون تردد التيار في لفائف الدوار اقل من تردد تيار الساكن. وتعد المحركات الحثية من اكثر الآلات الكهربائية انتشاراً حيث يعتمد عليها في ادارة المضخات وغيرها. ويندر استخدام الآلات الحثية كمولدات لعدم ملائمة خصائص اداء المولدات الحثية لمعظم التطبيقات.

2 - الآلات التزامنية (synchronous machines): ويتم فيها اثارة لفائف المجال بتيار مستمر حيث يؤدي دوران عضو المجال للآلة ثنائية الاقطاب الى توليد جهد متردد في لفائف المنتج يكون تردده مساوياً لسرعة العضو الدوار وذلك تعود تسميتها بالآلات التزامنية. وقد يكون عضو المجال الدوار ذو اقطاب بارزة ذات لفائف مركزة او اسطواني

ذو لفائف موزعة في زوج واحد من الاقطاب في العادة. ويعود الاختيار بين العضو الدوار ذو الاقطاب البارزة والعضو الدوار الاسطواني الى تردد التيار وسرعة المحرك الاولي والاعتبارات الميكانيكية عند التشغيل. ومن اشهر الآلات التزامنية المستخدمة في الحياة العملية المولدات التزامنية المستخدمة لتوليد الطاقة الكهربائية الضخمة في محطات القوى.

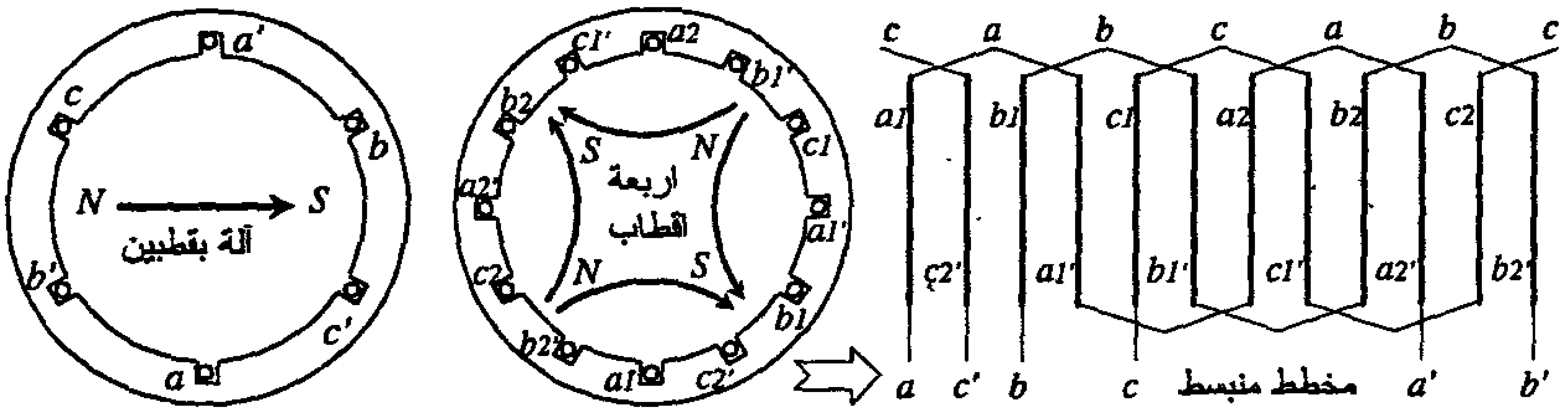
وفي مولدات التيار المتردد ثلاثية الاطوار يحث المجال المغناطيسي للفائف المجال في الدوار جهود ثلاثية الطور في لفائف المنتج في الساكن لتغذية الحمولة الكهربائية للمولد. وفي المقابل تنتج التيارات ثلاثية الطور في لفائف منتج محركات التيار المتردد ثلاثية الأطوار قوة دافعة مغناطيسية ق.د.م دوارة (rotating mmf) يؤدي تفاعل مجالها مع المجال المغناطيسي للفائف المجال في الدوار الى انتاج العزم المستمر المحرك. ومن الجدير بالذكر ان الجهد المتولد في لفائف المنتج يمر خلال دورة موجية كهربائية كاملة كلما عبرها زوج من اقطاب المجال وهو بذلك يمر بعدد من الدورات الموجية الكهربائية يساوي عدد ازواج اقطاب المجال لكل دورة ميكانيكية.

2.6 بنية المحركات الحثية.

تتكون الآلات الحثية وكما سبق ذكره من العضو الساكن الذي يضم لفائف المنتج والعضو الدوار الذي يضم لفائف المجال. وبينما يعود السبب في وضع لفائف منتج آلات التيار المستمر في العضو الدوار الى الحاجة لعملية التبديل التي يقوم بها المبدل، يعزى السبب في وضع لفائف منتج آلات التيار المتردد في العضو الساكن الى سهولة نقل التيار المتردد للفائف المنتج مباشرة وتجنب الحاجة لاستخدام اجزاء الاتصال المتحركة وما تسببه من صعوبات ومشاكل عند نقل التيارات ثلاثية الطور الضخمة. ويصنع الساكن من شرائح اسطوانية مجوفة من مادة فيرومغناطيسية محفور في سطحها الداخلي

شقوب طولية لحمل اللفائف. ويهدف استخدام الشرائح الفيرومغناطيسية الى تقليل فقودات الحديد الناتجة عن التيارات الدوامية والتخلفية المغناطيسية.

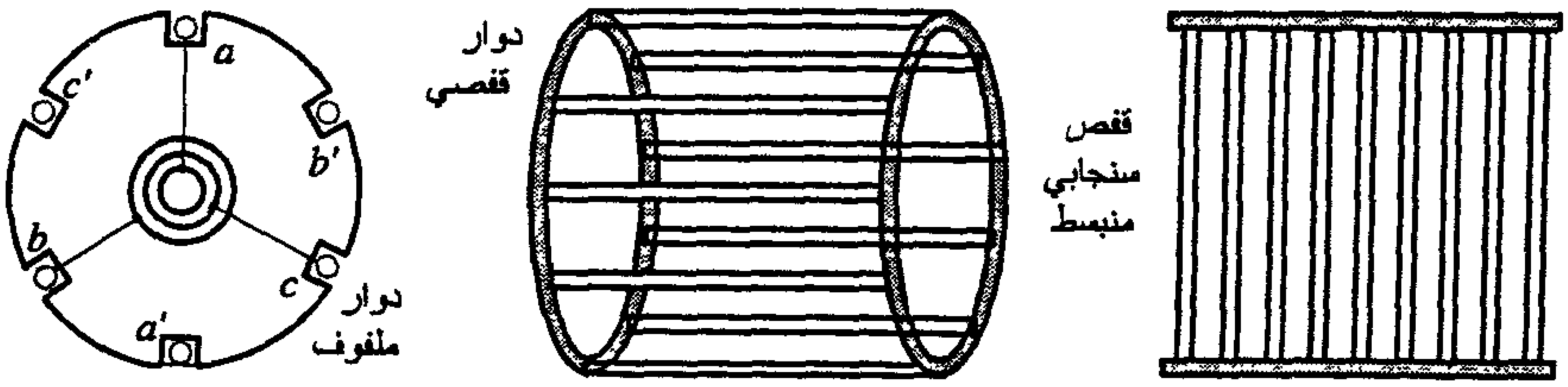
وتصنع لفائف المنتج في الآلات الكبيرة من ملفات جاهزة يتكون كل منها من عدة لفات وتوضع بشكل فردي في شقوب الساكن ليتم ربطها بالشكل المطلوب ليضم المنتج لفيفة واحدة لكل طور حيث توفر هذه البنية الوقت والتكلفة في صنع وصيانة الآلة. وتكون الازاحة الزاوية بين محاور لفائف الاطوار $90°$ كهربائية في الآلة ثنائية الطور و $120°$ كهربائية في الآلة ثلاثية الطور حيث تمثل الزاوية الكهربائية p ضرب الزاوية الميكانيكية $(\theta_e = p\theta_m)$ في الآلة التي تضم p زوج من الاقطاب، وكما في الشكل (1) الذي يبين توزيع اللفائف لمنتج آلات ثلاثية الطور ثنائية ورباعية الاقطاب. ومن الجدير بالذكر ان بنية العضو الساكن للآلات الحثية وترتيب لفائفه يشبه تماماً تكوين وترتيب لفائف العضو الساكن في الآلات التزامنية.



شكل (1) توزيع لفائف العضو الساكن للمحرك الحثي.

ويصنع العضو الدوار كذلك من شرائح من مادة فيرومغناطيسية لتكوين اسطوانة مصمتة محفور في سطحها الخارجي الشقوب اللازمة لحمل اللفائف. وتصنف المحركات الحثية ثلاثية الطور طبقاً لطبيعة وشكل اللفائف المستخدمة في العضو الدوار الى محركات الحلقات الزلاقة (slip-ring motors) ومحركات القفص السنجابي (squirrel-cage motors) كما في الشكل (2). ويحتوى دوار محركات الحلقات الزلاقة على لفائف ثلاثية الطور يتم ترتيبها في الشقوب على نحو مماثل لترتيب لفائف

الساكن في الآلات الحثية والتزامنية فيما يعرف بالدوار الملفوف (wound rotor). وتوصل لفائف الاطوار على هيئة مثلث او نجم لتنتهي اطرافها بثلاثة حلقات زلاقة مثبتة بعمود الدوار تمكن من توصيلها الى أية دائرة خارجية ثلاثية الطور عن طريق الفرش المثبتة في الساكن. ويميز محركات الحلقات الزلاقة امكانيات تغيير خصائص تشغيلها عن طريق الدوائر الخارجية التي يتم توصيلها بلفائف العضو الدوار ليتم التحكم في معاملاتها بشكل دقيق.



شكل (2) لفائف العضو الدوار للمحرك الحثي.

وفي المحركات ثلاثية الطور ذات القفص السنجابي تكون لفائف الدوار على شكل قضبان من النحاس او الالومنيوم تمتد عبر الشقوب وتقصر اطرافها بحلقتين طرفيتين من نفس مادة القضبان في العادة لتكوين قفص اسطواني مفتوح من جانبيه يشبه قفص السنجاب. ويكتسب الدوار في هذه الحالة نفس عدد الاقطاب والاطوار التي يمليها عليه المجال المغناطيسي للعضو الساكن. وتعد بساطة ورخص وتماسك الدوار القفصي وعدم حاجته للصيانة (لعدم وجود اجزاء تلامس متحركة مثل المبدل والحلقات الزلاقة والفرش) من العوامل الاساسية وراء الانتشار الواسع لاستخدام المحركات الحثية في الحياة العملية. ولا يشترط عزل القضبان عن الحديد لكون التيارات الناتجة عن ق.د.ك المنخفضة المحتثة في الدوار ستتدفق في المسار الاقل معاوقة الذي تمثله القضبان. وقد ترتب الشقوب والقضبان لتكون منحرفة (skewed) قليلاً عن الطول المحوري للدوار الاسطواني لتخفيض توافقيات ق.د.ك الدوار التي تسببها الاسنان وما ينتج عنها من ضجيج وعدم انتظام لعزم المحرك.

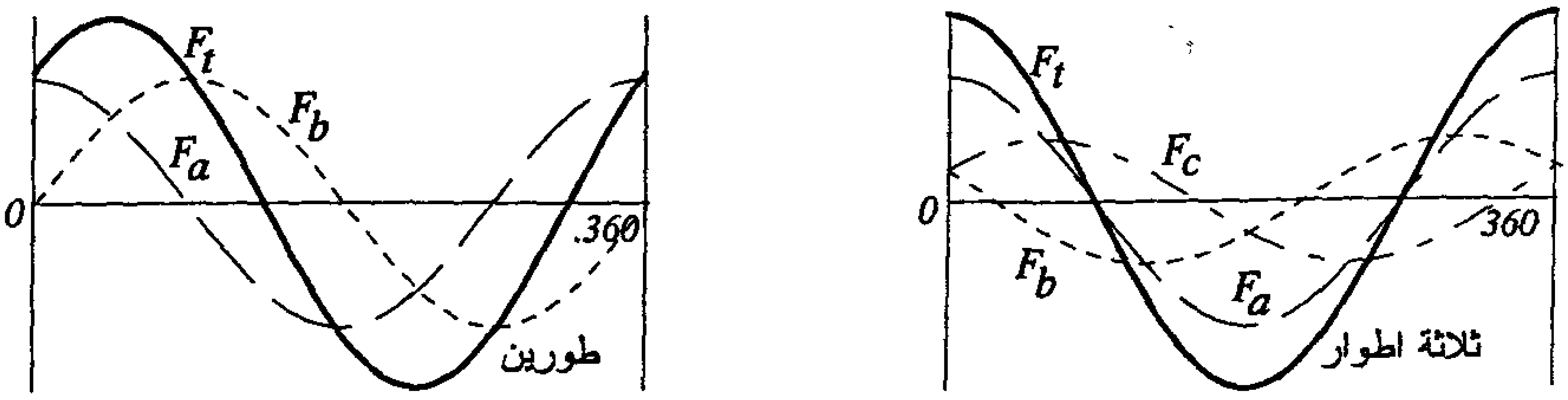
3.6 المجال المغناطيسي الدوار.

ان اهم الظواهر والمميزات التي تتفرد بها آلات التيار المتردد متعددة الاطوار وتلعب الدور الاساسي في نظرية عملها، هي وجود مجال مغناطيسي دوار في الثغرة الهوائية بين العضوين الساكن والدوار للآلة والتي تنشاء عن تدفق التيارات متعددة الاطوار في لفائف متعددة الأطوار للآلة. وللتبسيط يمكن البداية بدراسة المجال المغناطيسي الدوار لآلة ثنائية الطور يضم ساكنها ملفين متعامدين احدهما للطور a والآخر للطور b ينشآن ق.د.م بينها ازاحة $90°$ كهربائية كما في الشكل (3). وبفرض ان عدد اللفات الفعالة لكل طور N لفة والجهد المطبق على اللفائف ثنائية الطور متزن وذو موجة جيبية يمكن التعبير عن التيار اللحظي و ق.د.م اللحظية للطورين عند أي نقطة في الثغرة الهوائية تبعد θ درجة عن محور الاسناد الذي يمثله محور الطور a كما يلي (لاحظ ان $F=NI$ و $\cos\alpha \cos\beta = ½$ $[\cos(\alpha+\beta)+\cos(\alpha-\beta)]$):

$$i_a = I_m \cos \omega t, \qquad i_b = I_m \cos(\omega t - \pi/2) \qquad (6.1)$$

$$F_a = N i_a \cos\theta, \qquad F_b = N i_b \cos(\theta - \pi/2)$$
(6.2)

$$F_t = F_a + F_b = N I_m [\cos\omega t \cos\theta + \cos(\omega t-\pi/2)\cos(\theta\ \pi/2)]$$
$$= ½ N I_m [\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta - \pi)] = N I_m \cos(\omega t - \theta) \qquad (6.3)$$



شكل (3) ق.د.م لفائف العضو الساكن للمحرك الحثي متعدد الاطوار.

وتبين المعادلة (3.❖) ان محصلة المجال المغناطيسي للطورين F_t ذات سعة ثابتة وتدور بسرعة كهربائية ω في الثغرة الهوائية. ويمكن فهم ذلك بتصور وجود جهاز لقياس كثافة الفيض في الثغرة الهوائية يدور خلال الثغرة الهوائية على طول المسار الدائري بسرعة زاوية ثابتة ω نصف قطرية كهربائية في الثانية، فإن هذا الجهاز سيقابل كثافة فيض ثابتة على طول المسار. وسيبدو للجهاز وكأن هناك زوج من الاقطاب شمالي وجنوبي يدوران في الثغرة الهوائية على طول المسار الدائري بسرعة ω بوحدة نصف قطرية كهربائية في الثانية (ن.ق.ك/ثانية rad/s) تعرف بسرعة التزامن ω_S. ويستخدم الرمز n_S للدلالة على سرعة التزامن ميكانكياً بوحدة دورة في الدقيقة (د/د RPM) التي يحددها تردد التيار f وعدد ازواج الاقطاب p كما يلي:

$$\omega_S = \omega\,(\text{elec. rad/s}) = \omega / p\ (\text{mech. rad/s}) \qquad (6.4)$$

$$n_S = f\,(\text{elec.c/s}) = f/p\ (\text{mech. c/s}) = 60f/p\ (\text{RPM}) \qquad (6.5)$$

ويمكن اجراء التحليل السابق على آلة ثلاثية الطور تضم لفائف ثلاثة اطوار تنشيء ق.د.م ثلاثية الطور كما في الشكل (3b). وسيكون الفارق الوحيد هو وجود ثلاثة لفائف بينها ازاحة $120°$ وتحمل تيارات جيبية بينها ازاحة $120°$ كذلك. وعليه يمكن بسهولة الحصول على العلاقات التالية (لاحظ ان مجموع الكميات ثلاثية الطور المتزنة يساوي الصفر):

$$i_a = I_m \cos\omega t,\ i_b = I_m\ \cos(\omega\ t - 2\pi/3)\ ,\ i_c = I_m\ \cos(\omega\ t - 4\pi/3) \qquad (6.6)$$

$$F_a = N\ i_a\ \cos\theta\ ,\ F_b = N i_b \cos(\theta - 2\pi/3),\ F_c = N\ i_c\ \cos(\theta - 4\pi/3) \qquad (6.7)$$

$$F_t = F_a + F_b + F_c = N\,I_m\,[\cos\,\omega t\,\cos\,\theta + \cos(\omega t - 2\pi/3)\,\cos(\theta - 2\pi/3) + \cos(\omega t - 4\pi/3)\,\cos(\theta - 4\pi/3)]$$

$$= \frac{1}{2} N I_m [\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta - 4\pi/3) + \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3)]$$

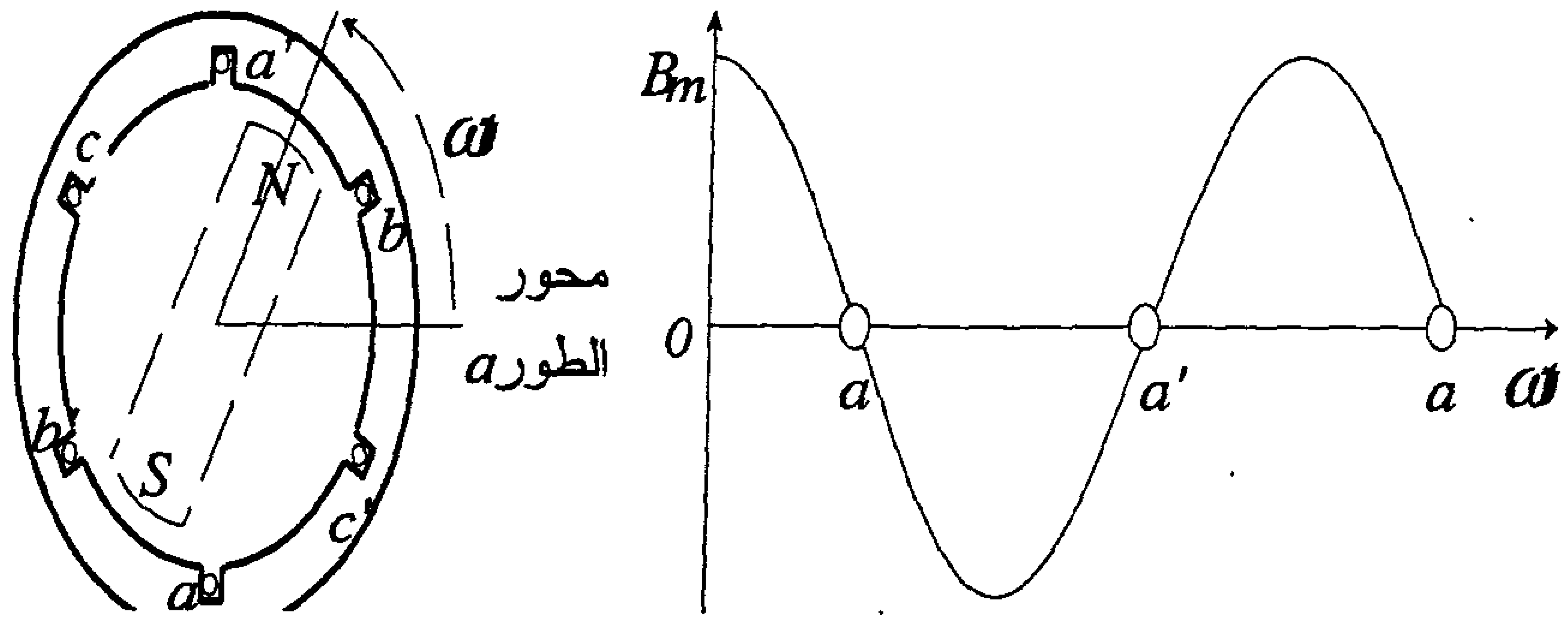
$$= (3/2) N I_m \cos(\omega t - \theta) \quad (6.8)$$

وهكذا يمكن انشاء مجال مغناطيسي دوار بتدفق تيار ثلاثي الاطوار في لفائف الآلة ثلاثية الاطوار بدون ادارة أي مغناطيس، ويمكن اثبات ان تبديل (تيارات) أي اثنين من الاطوار الثلاثة سيقلب اتجاه دوران المجال، أي يقلب اشارة θ في المعادلة (6.8). ويتضح مما سبق ان لفائف أي عدد من الاطوار m عند تغذيتها بتيارات متزنة ذات m طور ستنشئ مجال مغناطيسي جيبي دوار اذا ما كانت اللفائف موزعة بحيث تكون الازاحة الزاوية بين مركز لفائف أي طور والذي يليه $360°/m$ درجة كهربائية.

4.6 ق.د.م و ق.د.ك لفائف العضو الساكن.

تتحدد ذروة وشكل موجة ق.د.م و ق.د.ك منتج آلات التيار المتردد اساساً بترتيب اللفائف والشكل الهندسي العام للآلة حيث يحدد الاستخدام الاقتصادى للحيز والمواد المتاحة والتطبيقات المستهدفة الهيئة العامة لترتيب اللفائف والابعاد الهندسية للآلة. ولقد تبين فيما سبق ان تدفق تيارات ثلاثية الاطوار متزنة في لفائف ساكن آلات التيار المتردد ثلاثية الاطور يؤدي الى انشاء مجال مغناطيسي جيبي يدور في الثغرة الهوائية للآلة بسرعة التزامن.

وفي الآلة ثلاثية الاطوار ثنائية الاقطاب يمكن محاكاة المجال المغناطيسي الدوار للفائف الساكن بالمجال الناتج عن قطبين مغناطيسيين يدوران في الثغرة الهوائية بسرعة التزامن وينشآن مجال جيبي ذروته على طول مركز القطب كما في الشكل (4). وباعتبار محور الطور a كمحور اسناد ستكون كثافة الفيض الذي يشبكه عند قيمتها العظمى لحظة انطباق محور المجال الدوار على محور الطور a وتكون صفراً لحظة تعامدهما. وبذلك يمكن التعبير عن كثافة الفيض الذي يشبك ملف الطور a كما يلي:



شكل (4) توزيع كثافة الفيض للمجال المغناطيسي الدوار.

$$b = B_m \cos \omega t \qquad (6.9)$$

واذا كان عدد ازواج الاقطاب p ونصف قطر الدوار r وطوله المحوري l سيكون طول القوس المقابل للزاوية الكهربائية $d\theta$ حول المحور $rd\theta/p$ وتكون مساحة الشريحة الطولية المقابلة لها على السطح $l(rd\theta/p)$ والفيض عبرها $d\phi = b(lrd\theta/p)$. وبالتعويض عن b من (9) نحصل على فيض الثغرة Φ لكل قطب بتكامل $d\phi$ بين ضلعي الملف a من $-\pi$ الى π وكما يلي:

$$d\phi = b\,(l\,r\,d\theta/p) = (l\,r\,B_m/p)\cos\theta\; d\theta \qquad (6.10)$$

$$\Phi = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\phi = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (l\,rB_m/p)\cos\theta\; d\theta = 2l\,r\,B_m/p \qquad (6.11)$$

وبالتعويض عن B_m من (6.11) في (6.9) يمكن التعبير عن كثافة فيض مجال الثغرة الهوائية الذي يشبك ملف الطور a كما يلي:

$$b = B_m \cos \omega t \quad = (p\Phi/2rl)\cos \omega t \qquad (6.12)$$

وستكون سرعة دوران المجال الدوار مساوية لتردد تيار الساكن f دورة كهربائية في الثانية او f/p دورة ميكانيكية في الثانية. ولكون المجال الدوار سيقطع $2\pi r$ متر في الدورة ستكون سرعته الخطية على محيط

السطح الداخلي للساكن $v=(2\pi r)f/p$. وطبقاً لقانون الحث الديناميكي لفراداي سيحث هذا المجال الدوار ق.د.ك e_1 في موصلي كل لفة للطوار a تعطى بالعلاقة:

$$e_1=2blv=2[(p\Phi/2rl\ co\ \omega t]l[(2\pi r)f/p]=2\pi\Phi f\cos\omega t \quad (6.13)$$

واذا كان عدد لفات ملف الطور N لفة يمكن التعبير عن ق.د.ك اللحظية المحثة في ملف الطور a وقيمتها الفعالة E كما يلي:

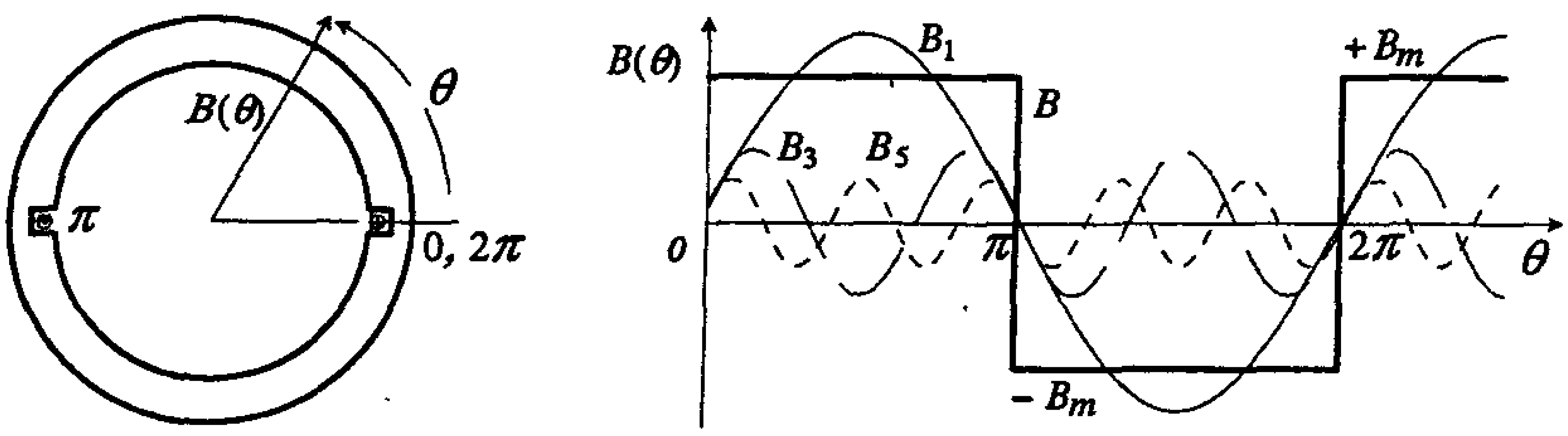
$$e_a=N\,e_1=2\pi N\Phi\,f\cos\omega t=E_m\cos\omega t \quad (6.14)$$

$$E=E_m/\sqrt{2}=2\pi N\Phi\,f/\sqrt{2}=4.443\,N\Phi\,f \quad (6.15)$$

ولقد تم اشتقاق ق.د.ك المعادلة (6.15) على اساس ان لفائف الطور مجمعة في شقبين لكل زوج من الاقطاب والازاحة الزاوية بين ضلعي الملف $180°$ كهربائية فيما يعرف باللفائف المركزة كاملة الخطوة (concentrated full-pitch windings). ومن غير المقبول عملياً جمع لفائف الساكن على اساس شقب واحد لكل قطب لكل طور حيث سيتطلب ذلك شقوب كبيرة مع ترك اجزاء كبيرة من سطح الساكن بدون ملفات. ويعيب اللفائف المركزة صعوبة تبديد الحرارة الناتجة عن تدفق تيار الموصلات مما قد يتلف عازل الملفات، وابتعاد شكل موجتي ق.د.م وق.د.ك عن الشكل الجيبي لتضم بعض التوافقيات الفردية. وفي الآلات العملية تكون ملفات الطور الواحد موزعة على عدد من الشقوب فيما يعرف باللفائف الموزعة (distributed) كما قد يتطلب الامر استخدام لفائف تكون خطوة ملفاتها اقل من خطوة القطب فيما يعرف بلفائف الخطوة القصيرة (short pitch).

1.4.6 ق.د.م اللفائف الموزعة.

لقـد تم في التحليـيلات السـابقة افـتراض ان ق.د.م و ق.د.ك لمـائف الساكن ذات موجة جيبية حيث تم اهمـال أي وجود للتوافقيات. وفي الواقع فـإن تحقيق ذلك عملياً يتطلب توزيع لفـائف كل طـور مـن لفـائف الاطـوار الثلاثة على عدد كبير جداً من الشقوب. ويؤدي تدفق التيار في أي ملف من ملفات الساكن الى انشاء مجال مغناطيسي ذو كثافة فيض لاجيبية ذات موجة مربعة كما في الشكل(5) حيث يمكن التعبير عن هذه الموجة باستخدام تحويلات فورير في صيغة المركبة الاساسية (fundamental) والتوافقيات الفردية (odd harmonics) والتي ستؤدي حتماً الى احتثات ق.د.ك توافقيات مناظرة في اللفائف كما يلي:

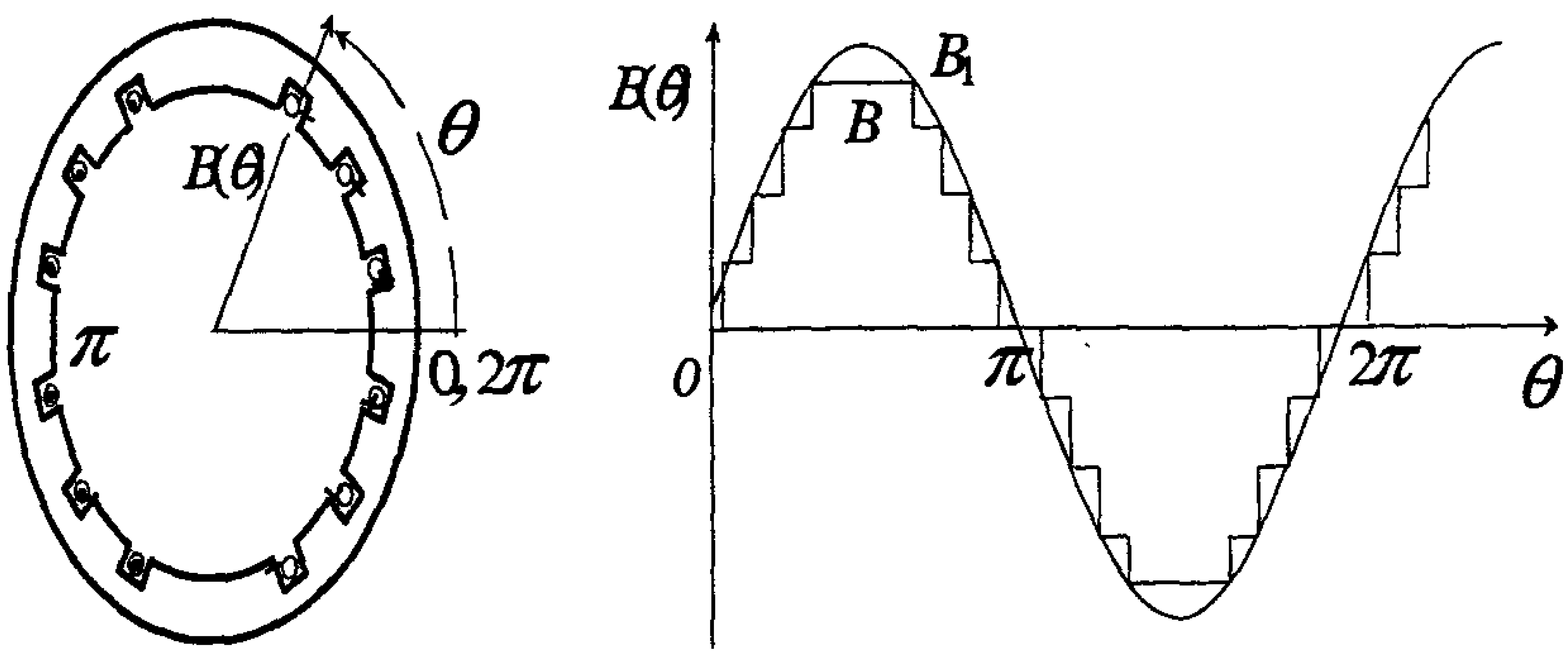


شكل (5) توزيع كثافة فيض لفائف مركزة.

$$B(\theta) = B_{m1} \sin \theta + B_{m3} \sin 3\theta + B_{m5} \sin 5\theta + \ldots \quad (6.16)$$

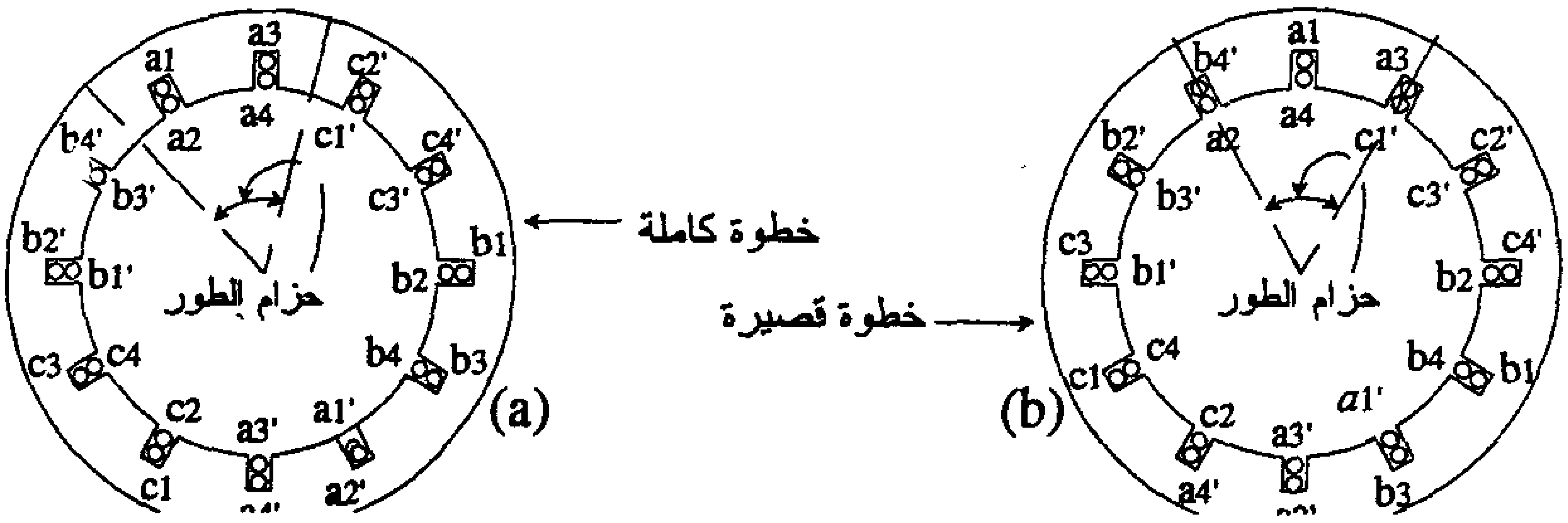
ويمكن خفض المركبات التوافقية في موجتي ق.د.م و ق.د.ك اللفائف فقط بتوزيع اللفائف على عدة شقوب لكل طور لكل قطب وكما في الشكل (6) الذي يبين ملف الساكن السابق وقد تم توزيع لفاته على اثنى عشرة شقب بدلاً من تركيزها في شقبين فقط. ويتضح من الشكل الموجي لكثافة الفيض ومركبته الاساسية الجيبية ان توزيع كثافة الفيض اصبح بفعل توزيع اللفائف اقرب كثيراً لأن يكون جيبياً مقارنة بالموجة المبينه في الشكل (5) للفائف المركزة. واذا امكن توزيع اللفائف على عدد لانهائي من الشقوب يمكن الحصول على ق.د.م جيبية في الثغرة الهوائية للآلة.

ولاستحالة تحقيق ذلك في الحياة العملية يكتفي بتوزيع اللفائف على عدد محدد من الشقوب واللجؤ الى وسائل اخرى لالغاء مركبات التوافقيات المتبقية ذات الرتب الصغيرة.



شكل (6) توزيع كثافة فيض لفائف موزعة.

وباستثناء الآلات الصغير غالباً ما تستخدم اللفائف ثنائية الطبقة (double layer) لرخص صنها وسهولة توصيلها من الخلف حيث يبين الشكل (7a) ترتيب لفائف ثنائية الطبقة كاملة الخطوة (full pitch) لآلة ثلاثية الطور ذات قطبين حيث يضم كل شقب ضلعى ملف وتبلغ الازاحة بين ضلعى الملف خطوة قطب كاملة أو $180°$ كهربائية وتكون الاضلع المتجاورة للطور حزام الطور. وفي المقابل يبين الشكل (7b) نفس اللفائف مع نقصان الازاحة بين ضلعي الملف لاقل من خطوة قطب كاملة فيما يعرف باللفائف قصيرة الخطوة (short pitch) أو ذات الخطوة الكسرية. وكثيراً ما تستخدم اللفائف قصيرة الخطوة في الآلات متعددة الاطوار لخفض المركبات التوافقية في موجة ق.د.م و ق.د.ك وتقصير الوصلات الخلفية للملفات.



شكل (7) توزيع كثافة فيض لفائف موزعة.

2.4.6 ق.د.ك اللفائف المتوزعة.

تبين فيما سبق ان توزيع اللفائف واتساع خطواتها يحددان الشكل الموجي لتوزيع ق.د.م المجال المغناطيسي الدوار للساكن ومن تم يحدان من قيمة ق.د.ك المحثثة في لفائفه. فمن جهة يؤدي توزيع اللفائف على اكثر من شقب لكل قطب لكل طور الى احداث ازاحة طورية بين اضلع ملفات الطور الواحد المحصورة في حزام الطور بدلاً من كونها منطبقة في حالة اللفائف المركزة، ومن الجهة الاخرى يؤدي استخدام الملفات قصيرة الخطوة الى خفض ق.د.ك المحثثة في الملف مقارنة بالملف كامل الخطوة. ويحدد تأثير الظاهرتين مجتمعتين معامل اللفائف (winding factor) k_W ليضاف الى المعادلة (15) لتخفضي ق.د.ك الساكن. وبفضل تأثير الظاهرتين يمكن التعبير عن معامل اللفائف كحاصل ضرب معاملين يمكن الحصول على صيغهما ببساطة وهما معامل التوزيع (distribution factor) k_d ومعامل الخطوة (pitch factor) k_p، حيث يمكن التعبير عن معادلة ق.د.ك المعدلة ومعاملات اللفائف كما يلي:

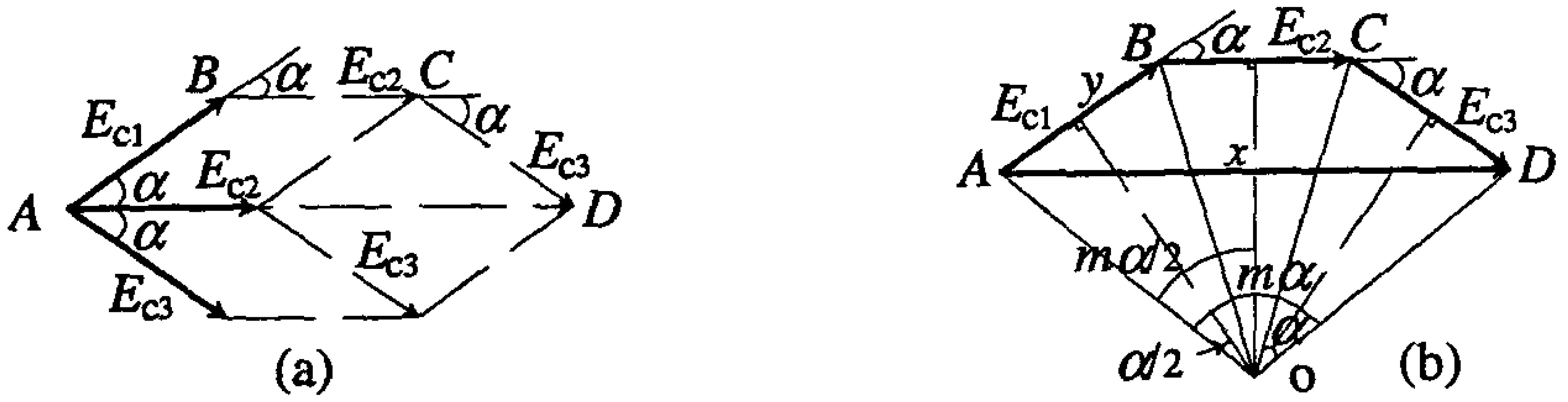
$$E = 4.443\, N\Phi\, f\, k_W = 4.443\, N\Phi\, f\, k_d\, k_p \qquad (6.17)$$

$$K_W = k_d\, k_p \quad , \quad k_d = \frac{\text{ق.د.ك اللفائف الموزعة}}{\text{ق.د.ك اللفائف المركزة}} \qquad (6.18)$$

$k_p =$ ق.د.ك اللفائف قصيرة الخطوة

ق.د.ك اللفائف كاملة الخطوة

واذا كان عدد الشقوب لكل قطب لكل طور للفائف الموزعة m والزاوية بين كل شقبين متجاورين α سيضم حزام الطور m متجه ق.د.ك بين كل منها ازاحة زاوية كهربائية α لتكون زاوية حزام الطور الكلية $m\alpha$ درجة كهربائية كما في الشكل (8a). ولتسهيل الحصول على صيغة عامة لمعامل التوزيع يمكن تمثيل متجهات ق.د.ك كل طور ليبدأ كل متجه من نهاية الآخر مع بقاء نفس الازاحة الزاوية بينهما وكما في الشكل (8b) حيث يكون كل متجه ق.د.ك وتر تقابله الزاوية α عند مركز الدائرة 0. وفي هذه الحالة سيمثل الوتر الممتد من بداية الى نهاية المتجهات محصلة ق.د.ك الطور والتي يتضح انها اقل من المجموع الحسابي لهذه المتجهات والذي سيمثل ق.د.ك الطور اذا كانت جميع الملفات مركزة في شقب واحد فقط والزاوية α صفر. واذا كانت ق.د.ك الملف E_C ومحصلة ق.د.ك الملفات الموزعة E_p يمكن من الشكل (8b) التعبير عن معامل التوزيع كما يلي:



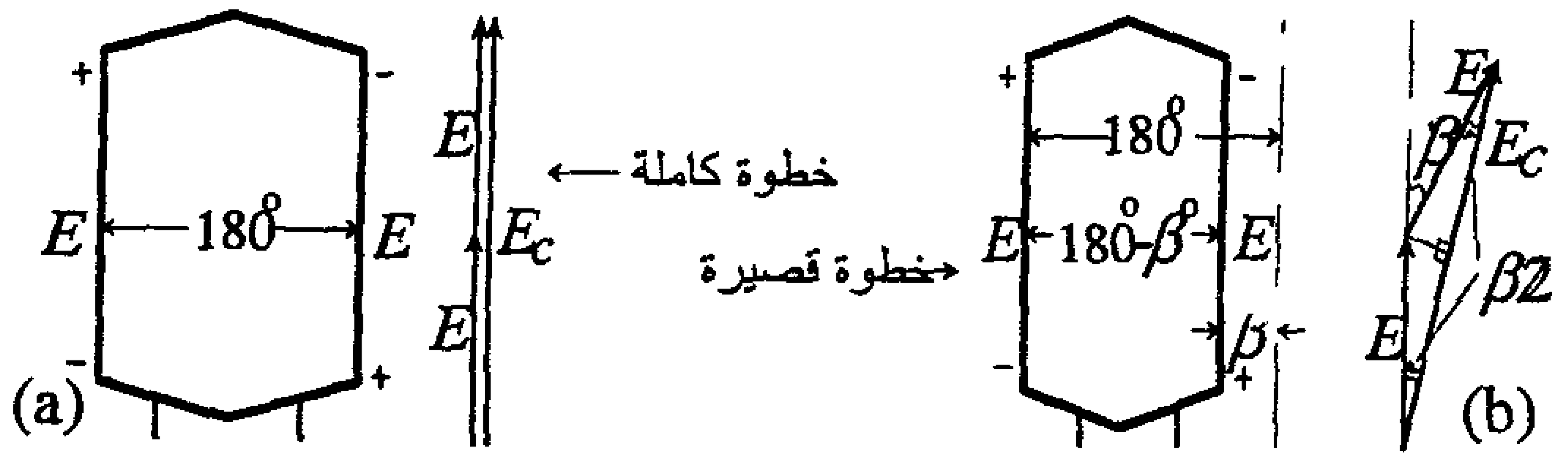
شكل (8) ق.د.ك ملفات اللفائف الموزعة.

$$k_d = E_p / \Sigma E_C = AD / (m.AB) = 2Ax / (m.2Ay) = Ax / (m.Ay)$$

$$k_d = 0A \ \sin(m\alpha/2) \ / \ [m.0A \ \sin(\alpha/2)] = \sin(m\alpha/2) \ / \ [m.\sin(\alpha/2)] \qquad (6.19)$$

واذا كانت اللفائف قصيرة الخطوة سيكون باع الملف أو الزاوية بين ضلعية اقل من خطوة القطب بزاوية β درجة كهربائية لتكون الازاحة

الزاوية بين ق.د.ك ضلعي الملف $(180°-\beta)$ بدلاً من $180°$ في اللف كامل الخطوة كما في الشكل (9a). وبما ان ق.د.ك الملف هي محصلة ق.د.ك ضلعيه تكون ق.د.ك الملف قصير الخطوة اقل منها في الملف كامل الخطوة. فبينما تبلغ ق.د.ك ضلعي الملف كامل الخطوة ذروتها عند نفس اللحظة تبلغ ق.د.ك احد ضلعي الملف قصير الخطوة الذروة قبل وصول ق.د.ك الضلع الآخر اليها. ويمكن توضيح ذلك بالمخطط الطوري المبين في الشكل (9b) الذي يمثل ق.د.ك ضلعي الملف قصير الخطوة متساويتين في المقدار E وبينها ازاحة زاوية β حيث يمكن التعبير عن معامل الخطوة k_p كما يلي:



شكل (9) ق.د.ك الملفات كاملة الخطوة وقصيرة الخطوة.

$$k_p = E_c / 2E = 2E\cos(\beta/2) / 2E = \cos(\beta/2) \qquad (6.20)$$

5.6 سلوك المحرك الحثي ثلاثي الطور.

يمكن لدراسة سلوك المحرك الحثي ثلاثي الطور في الحالة الثابتة البدء بدراسة اداء المحرك في حالة سكون الدوار نتيجة لفتح دائرته وعدم تدفق التيار في لفائف الدوار ومن ثم عدم انتاج العزم اللازم لادارة المحرك.فاذا تم توصيل لفائف الساكن بمصدر ثلاثي الطور سينشئ ذلك مجال دوار بسرعة التزامن n_s يحثث ق.د.ك في لفائف الساكن والدوار المتوقف عند نفس التردد f_1. واذا كان التردد الزاوي لتيار المصدر $\omega_s = 2\pi f_1$ ستكون السرعة الزاوية للمجال المغناطيسي الدوار ω_s $(elec.rad/s)$ بغض النظر عن عدد الاقطاب وعند السكون سينظر كل ملف من لفائف الدوار الى

فيض المجال الدوار للساكن يعبره بسرعة ω_s. وسيعمل المحرك في هذه الحالة كالمحول لتمثل لفائف الساكن الجانب الابتدائي ولفائف الدوار الجانب الثانوي حيث يمكن من المعادلة (6.17) الحصول على القيم الفعالة لـ ق.د.ك الساكن E_1 والدوار E_2 ونسبة التحويل الفعالة (عند السكون) كما يلي:

$$E_1 = 4.443\, N_1 \Phi\, f_1\, k_{w1}\ ,\ E_2 = 4.443\, N_2 \Phi\, f_2\, k_{w2} \quad (6.21)$$

$$a = E_1/E_2 = (N_1\, k_{w1}) / (N_2\, k_{w2}), \qquad (f_2 = f_1) \qquad (6.22)$$

وعند غلق دائرة الدوار ستؤدى ق.د.ك المحثثة في لفائفه نتيجة للمجال الدوار للساكن الى تدفق التيار في لفائف الدوار والذي بدوره يتفاعل مع مجال الثغرة الهوائية لانتاج عزم دوران الدوار بسبب تعرض لفائفه التي تحمل التيار للقوى الكهرومغناطيسية التي تحاول تحريكها طبقاً للقانون ($F=Bli$) مما يبدا في ادارة الدوار، اذا كان حر الحركة، في اتجاه دوران المجال الدوار. ويمكن في هذه الحالة النظر الى المجال الدوار للساكن وكأنه يجر معه العضو الدوار الذي سينزلق ويتباطاء بالنسبة للمجال الدوار مع زيادة حمولته الميكانيكية. ومن الجدير بالملاحظة ان الدوار لو دار بسرعة التزامن ستكون لفائفه ساكنة بالنسبة للمجال الدوار في الثغرة الهوائية ومن تم لن تحثث فيها أي ق.د.ك ولن يتدفق فيها التيار وبالتالى لن ينتج أي عزم في الآلة، وهذا يعني ان سرعة المحرك الحثي لايمكن لها ان تصل سرعة التزامن وان كانت ستقترب منها اكثر عند اللاحمل.

واذا كانت سرعة دوران الدوار في الحالة الثابتة ω (*elec.rad/s*) او n (*RPM*) سينظر كل ملف من لفائف الدوار الى فيض المجال الدوار للساكن وهو يعبره بسرعة زاوية ω_s-ω حيث سيبدو العضو الدوار وكأنه ينزلق خلف المجال الدوار (الذي يجره) بسرعة ω_s-ω (*elec.rad/s*) او n_s-n (*RPM*) والتى تعرف بسرعة الانزلاق (slip speed). وعادة ما تسمى

نسـبة سـرعة الانـزلاق الى سـرعة التـزامن بمعامـل الانـزلاق s (slip) والـذي يعطى كنسبة واحدية أو مئوية كما يلي:

$$s = (\omega_S - \omega) / \omega_S = (n_S - n) / n_S \qquad (6.23)$$

$$\omega_S - \omega = s\omega_S \; , \; n_S - n = s\, n_S \qquad (6.24)$$

وفي هـذه الحالـة سـيتحدد تـردد ق.د.ك وتيـار لفـائف الـدوار بسـرعة الانزلاق والتي تمثل سرعة المجال المغناطيسي الدوار للساكن نسبة الى لفائف الدوار التي تدور مع دوران الدوار مما يجعل التردد الزاوي لتيار الدوار مسـاوياً للسرعة الزاوية للانزلاق بوحدات (elec.rad/s) أو تـردد الانـزلاق بالـدورة في الثانيـة (c/s) أو الهيرتـز Hz. ويتبين بـذلك ان السـلوك الكهربـائي للمحـرك الحثـي لا يشبه المحول فحسب بل يزيد عليه بامكانية تحويل التردد. ومما سبق يمكن التعبير عن سرعة الدوار وتردد تياره نسبة الى القيم المناظرة للمجال الدوار كما يلي:

$$\omega = \omega_S(1 - s), \qquad n = n_S(1 - s) \qquad (6.25)$$

$$f_2 = (\omega_S - \omega) / 2\pi = s\omega_S / 2\pi = s f_1$$

$$= (n_S - n)\, p / 60 = s\, n_S\, p / 60 = s f_1 \qquad (6.26)$$

ويتضح من المعادلة (6.26) ان الانزلاق سيكون واحد عند السكون وقبل بدء الحركة حيث تكون سرعة الدوار صفر ويكون تردد تيـار لفـائف الـدوار مساوي لتردد تيـار لفـائف السـاكن. وبـذلك سينشـئ تيـار الـدوار عنـد البدء المجال الدوار للـدوار والـذي يـدور بنفس سـرعة المجـال الـدوار للسـاكن مما ينتج عزم البدء الذي يحاول ادارة الدوار في اتجاه المجال الـدوار للسـاكن حيث سيصل الدوار لسرعة التشغيل اذا كان عزم البدء المنتج كافياً للتغلب على العزم الميكانيكي للحمولة. ويمكن الحصول على سرعة المجال الـدوار الناشئ عن تيـار لفـائف الـدوار بالنسـبة للـدوار نفسـه ω_2 وسـرعتة بالنسـبة للساكن ω_2' كما يلي:

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi s f_1 = s\omega_s \qquad (6.27)$$

$$n_2 = 60 f_2 / p = 60 s f_1 / p = s n_s \qquad (6.28)$$

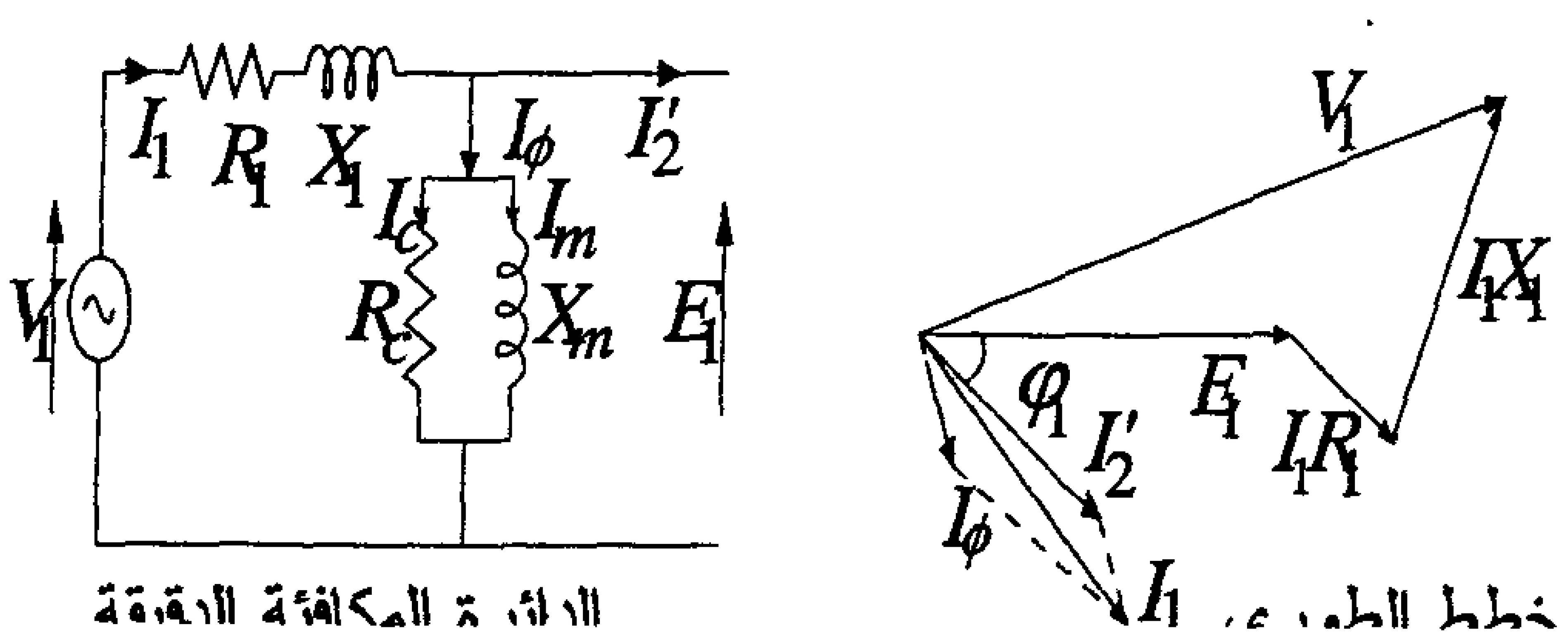
$$\omega_2' = \omega_2 + \omega = s\omega_s + \omega_s(1 - s) = \omega_s \qquad (6.29)$$

$$n_2' = n_2 + n = s n_s + n_s(1 - s) = n_s \qquad (6.30)$$

أي ان المجال الدوار للعضوين الساكن والدوار يدوران معاً بسرعة التزامن ويعتبران ساكنان بالنسبة لبعضهما البعض مما ينتج عزم مستمر يحافظ على دوران المحرك حيث لن ينتج هذا العزم عند دوران المحرك بسرعة التزامن.

6 .6. نمذجة المحرك الحثي ثلاثي الطور.

تحدد ق.د.م و ق.د.ك لفائف ساكن ودوار المحرك الحثي ثلاثي الطور والعوامل التي تحكمها سلوك المحرك في الحالة الثابتة حيث يمكن دراسة اداء المحرك بترجمة ذلك الى دائرة مكافئه (equivalent circuit) تكفي لتحليل اداء المحرك بدقة كافية. فعند تدفق التيار في لفائف الساكن والدوار سينشئ كل منهما مجالها المغناطيسي الدوار الخاص بها، حيث يدور المجالان معاً بنفس السرعة لينتجان محصلة المجال المغناطيسي للثغرة الهوائية والتي تدور بسرعة التزامن لتحث ق.د.ك في لفائف الساكن عند تردد f_1 وفي لفائف الدوار عند تردد f_2 بما يشبه عمل المحولي ويسمح بتطوير نموذج شبيه بالدائرة المكافئة للمحول. وبالنظر الى محرك ثلاثي الطور ذو دوار ملفوف لفائفه متماثلة وموصلة على هيئة نجم (star) ويغذى من مصدر متزن، يمكن في الحالة الثابتة نمذجة دائرة الساكن بالدائرة المكافئة للطور الواحد المبينه في الشكل (10) كما يلي:



شكل (10) الدائرة المكافئة لساكن المحرك الحثي.

وكما في الدائرة المكافئة للمحول تمثل R_1 مقاومة لفائف الساكن وتمثل X_1 مفاعلة التسرب وينظر الى تيار الساكن على انه يتكون من مركبة تيار الحمل I_2' اللازمة لمعادلة ق.د.م الناتجة عن تدفق تيار لفائف الدوار ومركبة تيار الاثارة $I\phi$ والذي ينظر اليه بدوره على انه يتكون من مركبة تيار المغنطة I_m اللازم لانتاج محصلة الفيض في الثغرة الهوائية ويسري في مفاعلة المغنطة X_m ومركبة تيار الفقد I_C اللازم لتغذية فقودات التيار الدوامي والتخلف المغناطيسي ويسرى في مقاومة فقد اللب R_C. ومن الدائرة المكافئة للساكن يمكن كتابة المعادلات التالية (الحروف العريضة تمثل متجهات كميات مركبة):

$$I_1 = I_2' + I\phi \qquad (6.31)$$

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1+jX_1) \qquad (6.32)$$

ويتضح ان الدائرة المكافئة للساكن والمبينة في الشكل (10) تشبه تماماً الدائرة المكافئة الدقيقة للملف الابتدائي للمحول ولا تختلف الدائرتان الا في القيم النسبية لمعاملاتها حيث يكون تيار الاثارة اكبر في المحرك وقد يصل الى 50٪ من التيار المقنن مقارنة بحوالي 5% من التيار المقنن في المحول بسبب وجود الثغرة الهوائية في المحرك. وكذلك تكون مفاعلة التسرب اكبر

في المحرك مقارنة بالمحول نتيجة لوجود الثغرة الهوائية وتوزيع لفائف الساكن على المحيط بدلاً من تمركزها في المحول. ولاكمال الدائرة المكافئة لابد من اخذ تأثيرات الدوار في الاعتبار.

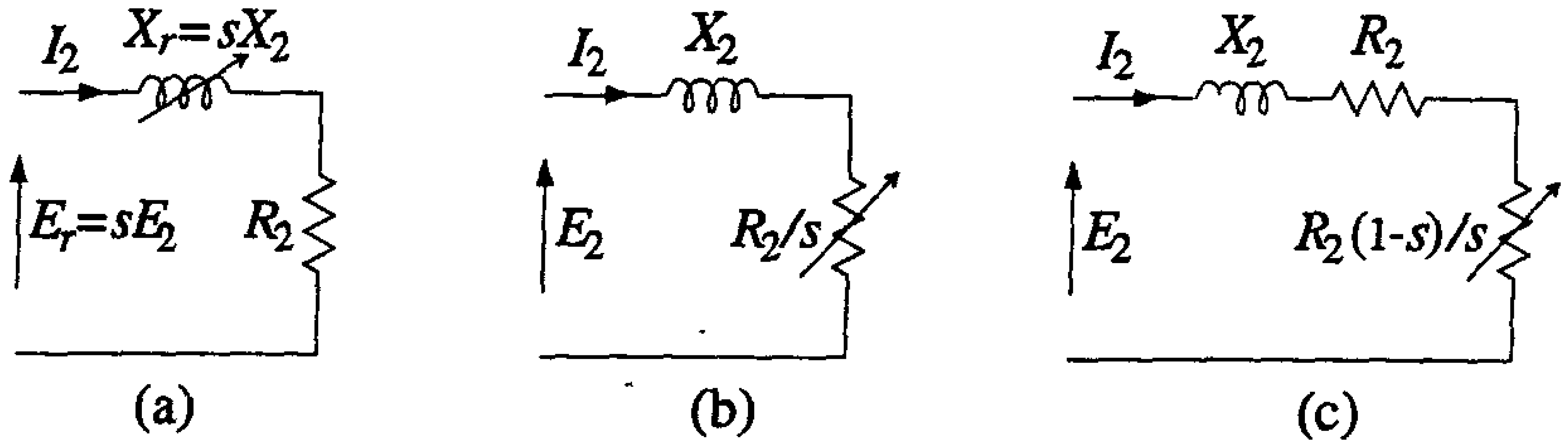
وستؤدى زيادة الحمولة الميكانيكية الى تباطؤ الدوار وزيادة سرعة الانزلاق مما يؤدي الى ارتفاع ق.د.ك وتيار لفائف الدوار. وسواء كان الدوار ملفوف او قفصي ينشئ تياره ق.د.م بنفس عدد اقطاب واطوار وسرعة ق.د.م الساكن ولكنها مضادة لها. وتتطلب معادلة ق.د.م الدوار سحب مركبة الحمل من تيار الساكن لتعويضها ومن تم سحب قدرة اضافية من المصدر للحفاظ على العزم الناتج عن تفاعل ق.د.م الساكن والدوار. وهكذا فإن الساكن لا يحس بما يدور في دائرة الدوار الا من خلال ق.د.م الدوار في الثغرة الهوائية تماماً كما يحس الملف الابتدائي للمحول بالتغيرات في دائرة الثانوي من خلال التغيرات في الفيض و ق.د.م المتبادلين بين اللفائف مما يمكن من تمثيل الدوار بدائرة مكافئة تشبه الدائرة المكافئة للملف الثانوي للمحول.

ومن الجذير بالملاحظة ان الفارق الاساسي بين دائرة الدوار للمحرك الحثي ودائرة الثانوي للمحول يكمن في تغير ق.د.ك ومفاعلة التسرب للفائف الدوار مع سرعة دورانه والتي تحدد تردد تياره، بينما تعد ق.د.ك ومفاعلة التسرب ثابتة في المحول. وبما ان مقدار ق.د.ك المحتثة في لفائف الدوار يتناسب مع الحركة النسبية بين هذه اللفائف والمجال الدوار في الثغرة ستكون ق.د.ك ومفاعلة التسرب للدوار اكبر ما يمكن عندما يكون الدوار في حالة توقف تام لتقل مع زيادة سرعة الدوار الى ان تصل الصفر في حالة دوران الدوار عند سرعة التزامن حيث لا توجد حينها حركة نسبية بين لفائف الدوار والمجال الدوار للثغرة.

ومع ثبوت مقاومة لفائف الدوار R_2 يمكن من المعادلات (6.21) و(6.22) و (6.26) التعبير عن ق.د.ك E_r ومحاثة التسرب الفعلية للدوار X_r عند تردد f_2 بدلالة قيمها E_2 و X_2 عند سكون الدوار (حيث يكون الانزلاق $s=1$ ويكون تردد الساكن والدوار متساويان $f_2=f_1$ ومن تم الحصول على الدائرة المكافئة للدوار المبينة في الشكل (11a) وتيارها كما يلي:

$$E_r = 4.443\ N_2\Phi\ \ f_2\ k_{w2} = 4.443\ N_2\Phi\ \ s\ f_1\ k_{w2} = s\ E_2 \quad (6.33)$$

$$X_r = 2\ \pi f_2\ L_2 = 2\ \pi s f_1\ L_2 = s\ X_2 \qquad (6.34)$$



شكل (11) الدائرة المكافئة لدوار المحرك الحثي.

$$I_{2s} = s\ E_2\ /\ (R_2 + jsX_2) \qquad (6.35)$$

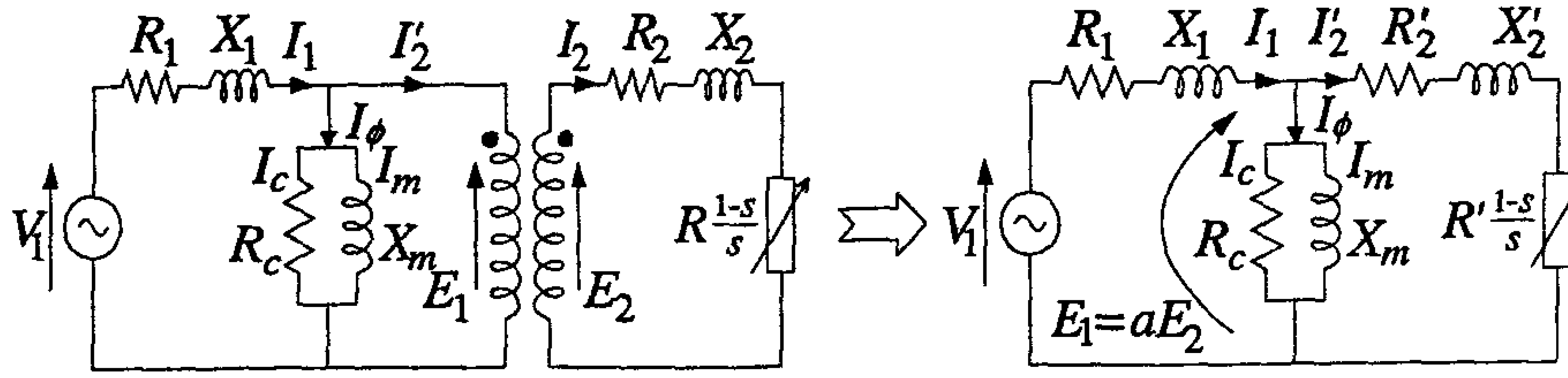
وبقسمة بسط ومقام المعادلة (6.35) على s يمكن التعبير عن تيار الدوار ورسم دائرته المكافئة كما في الشكل (11b) حيث:

$$I_2 = E_2\ /\ (R_2/s + jX_2) \qquad (6.36)$$

وبالرغم من تساوي مقدار وزاوية طور التياران I_{2s} المعطي بالمعادلة (6.35) و I_2 المعطي بالمعادلة (6.36) يوجد اختلاف اساسي ومهم بين التيارين ودوائرهما المكافئة يتمثل في اختلاف ترددهما حيث يكون تردد التيار I_{2s} والدائرة المكافئة في الشكل (11a) f_2 بينما يكون تردد التيار I_2 والدائرة المكافئة في الشكل (11b) f_1. وبذلك تكون الاخيرة مماثلة

تماماً للدائرة المكافئة للملف الثانوي للمحول وتتميز كذلك بثبوت المفاعلة بينما تغير المقاومة الكلية مع التردد وبالتالي مع الحمل.

ويمكن بفك المقاومة R_2/s الى مقاومة اللفائف R_2 ومقاومة الحمولة $R_2(1\text{-}s)/s$ الحصول على الدائرة المكافئة المعدلة للدوار المبينة في الشكل (11c) والتي تشترك مع الدائرة المكافئة للساكن المبينة في الشكل (10) في كون تردد كل منهما يساوي تردد المصدر f_1 مما يمكن من نسب الدائرة المكافئة للدوار الى الدائرة المكافئة للساكن كما هو الحال عند نسبة الدائرة المكافئة للمحول للجانب للابتدائي. وبذلك يمكن الحصول على الدائرة المكافئة الدقيقة للمحرك الحثي المبينة في الشكل (12) حيث يمكن باستخدام نسبة عدد اللفات الفعالة a المعطاة بالمعادلة (6.22) الحصول على معاملات الدائرة كما يلي:



شكل (12) الدائرة المكافئة الدقيقة للمحرك الحثي.

$$E_2' = aE_2 ,I_2' = I_2 / a ,R_2' = a^2R_2 , \quad X_2'=a^2X_2 \quad (6.37)$$

وتمثل القدرة المستهلكة في المقاومة الكلية R_2/s القدرة المنقولة عبر الثغرة الهوائية P_e والتي تتناسب عكسياً مع الانزلاق وهي تشمل القدرة الميكانيكية الكلية للمحرك P_{mt} (وتضم صافي القدرة الخارجة والفقودات الميكانيكية) والفقد الاومي في مقاومة لفائف الدوار P_{c2}. ويمكن من الشكل (12) التعبير عن P_e و P_{c2} و P_{mt} والعزم الميكانيكي الكلي T_{mt} كما يلي:

$$P_e = I_2^2R_2/s = I_2'^2R_2'/s \qquad (6.38)$$

$$P_{c2} = I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2' = sP_e \qquad (6.39)$$

$$P_{mt} = P_e - P_{c2} = I_2^2 R_2(1-s)/s = I_2'^2 R_2'(1-s)/s = (1-s)P_e \qquad (6.40)$$

$$T_{mt} = P_{mt}/\omega = I_2^2 R_2(1-s)/(s\omega) = I_2^2 R_2/(s\omega_s)$$

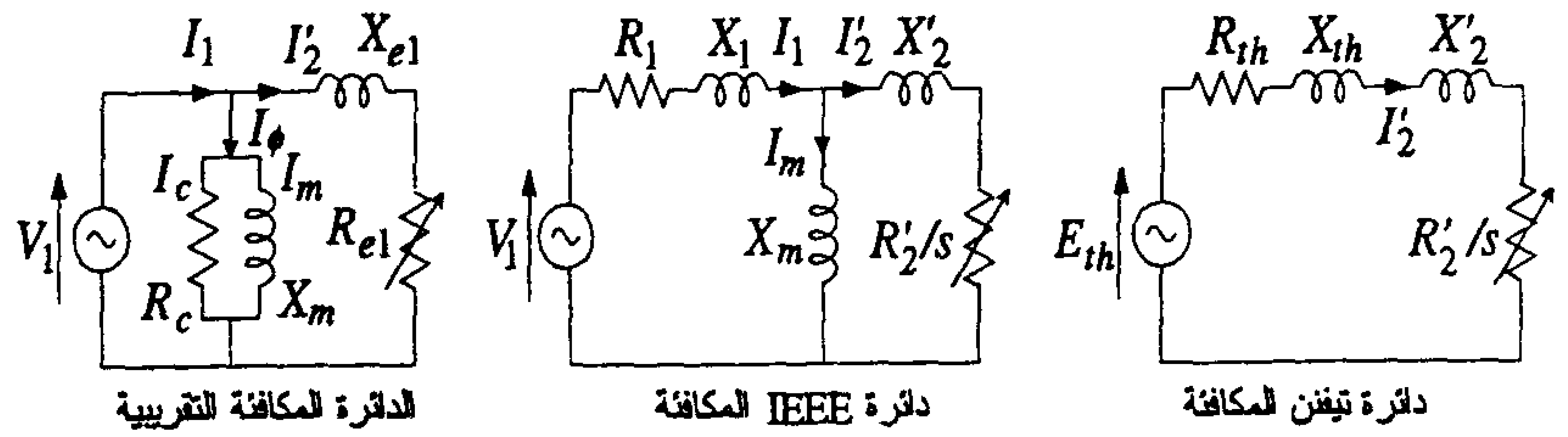
$$= I_2'^2 R_2'(1-s)/(s\omega) = I_2'^2 R_2'/(s\omega_s) \qquad (6.41)$$

ويتضح من المعادلات (6.38) الى (6.40) ضرورة تشغيل المحرك الحثي عند سرعة قريبة من سرعة التزامن (انزلاق منخفض) لتجنب التشغيل عند كفاءة منخفضة حيث عادة ما يكون الانزلاق عند الحمل المقنن بين 1٪ الى 5٪. كما تجدر الاشارة الى ان جميع المعاملات والقدرات التي وردت في المعادلات السابقة تشير الى كميات طور واحد فقط.

1.6.6 تبسيط الدائرة المكافئة للمحرك الحثي.

تعد الدائرة المكافئة الدقيقة المبينة في الشكل (12) غير عملية لتقييم اداء المحرك الحثي لتعقيد تعبير تيار الحمولة حيث يتطلب الحصول على صيغة ابسط للتيار استخدام صور ابسط للدائرة المكافئة لتسهيل تحليلها بتقريب مقبول في النتائج. وكما في محول القوى يمكن نقل فرع المغنطه الى اطراف المحرك للحصول على الدائرة المكافئة التقريبية المبينة في الشكل (13) والتي تسمح بحساب تيار الحمولة وتيار المغنطة بشكل مستقل ودون الحاجة لمعرفة ثوابت فرع أي منهما عند حساب تيار الآخر. ويشترط لقبول هذا التقريب صغر هبوط الجهد والفقد الناتجين عن مرور تيار الاثارة في معاوقة الساكن مقارنة بمقننات الالة. ويجدر بالذكر ان الخطأ الناتج عن استخدام الدائرة المكافئة التقريبية للمحرك الحثي اكبر من نظيره في المحول لكبر نسبة تيار الاثارة الى التيار الحمولة في المحرك والتي قد تفوق 10 اضعاف قيمتها في المحول. وقد شاع استخدام هذه الدائرة لسهولة تعيين

معاملاتها واستخدامها لتقيم اداء المحرك بالمخطط الدائري (circle diagram) الذي تقلصت الحاجة لاستخدامه بظهور الحواسيب. ويمكن من الدائرة المكافئة التقريبية التعبير تقريبياً عن تيار الدوار بدون معرفة معاملات فرع المغنطة كما يلي:



شكل (13) الدوائر المكافئة المعدلة للمحرك الحثي.

$$R_{e1} = R_1 + a^2 R_2/s = R_1 + R_2'/s \qquad (6.42)$$

$$X_{e1} = X_1 + a^2 X_2 = X_1 + X_2' \qquad (6.43)$$

$$I_2' = V_1/\sqrt{(R_{e1}^2 + X_{e1}^2)} = V_1/\sqrt{[(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]} \qquad (6.44)$$

وعند تغذية المحرك الحثي من مصدر ثابت الجهد والتردد ستكون فقودات الحديد ثابتة في الساكن ولكنها تتناسب في الدوار طردياً مع تردده أو عكسياً مع سرعته، مما يجعل فقودات الحديد الكلية التي تمثلها المقاومة R_C تتناسب عكسياً مع السرعة. وفي المقابل تتناسب الفقودات الميكانيكية والتي تشمل فقودات الاحتكاك واضطراب الهواء طردياً مع السرعة بحيث يمكن اعتبار محصلة الفقودات الميكانيكية وفقودات الحديد، والتي يطلق عليها الفقودات الدورانية ثابتة على مدى سرعات التشغيل. وبذلك يمكن اعتبار الفقودات الدورانية جزء من الحمولة الميكانيكية ومن تم حذف المقاومة R_C للحصول على الدائرة المكافئة الدقيقة للمحرك الحثي الموصي بها من قبل مؤسسة *IEEE* والمبينة في

الشكل (13).

ويجدر بالملاحظة ان التيار المشتق من الدائرة المكافئة التقريبية والمعطى بالمعادلة (6.44) يتضمن نسبة خطأ في حدود 10٪. ويمكن تحليل اداء المحرك بشكل اكثر دقة باستخدام دائرة تيفنن المكافئة المبينة في الشكل (13) والتي يمكن الحصول عليها من دائرة IEEE المكافئة المبينه في الشكل (13). ويمكن طبقاً لنظرية تيفنن استبدال دائرة الساكن بمعاوقة تيفنن $(R_{th}+jX_{th})$ التي تظهر عند النظر الى دائرة الساكن من الخلف (مع قصر المصدر)، على التوالي مع جهد تيفنن E_{th} بين طرفي دائرة الساكن من الخلف (عند فتح هذين الطرفين). ويمكن في هذه الحالة التعبير عن جهد ومعاوقة تيفنن كما يلي:

$$E_{th} = I_1 X_m = \frac{V_1}{Z_T} X_m = \frac{V_1 X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

(6.45)

$$Z_{th} = jX_m // (R_1 + jX_1) = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = \frac{X_m(jR_1 - X_1)[R_1 - j(X_1 + X_m)]}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}$$

(6.46)

$$= \frac{X_m[R_1(X_1 + X_m) - R_1 X_1]}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} + j\,\frac{X_m[X_1(X_1 + X_m) + R_1^2]}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} = R_{th} + jX_{th}$$

(6.47)

وبملاحظة ان $R_1{}^2 << (X_1+X_m)^2$ و $R_1{}^2 << X_1\ (X_1+X_m)$

نحصل بتبسيط المعادلتين (45) و (47) على التيار I_2' كما يلي:

$$E_{th} = \frac{V_1 X_m}{X_1 + X_m} = K_{th} V_1, \qquad K_{th} = \frac{X_m}{X_1 + X_m} \qquad (6.48)$$

$$R_{th} = \frac{R_1 X_m^2}{(X_1 + X_m)^2} = K_{th}^2 R_1, \quad X_{th} = \frac{X_1 X_m}{X_1 + X_m} = K_{th} X_1 \qquad (6.49)$$

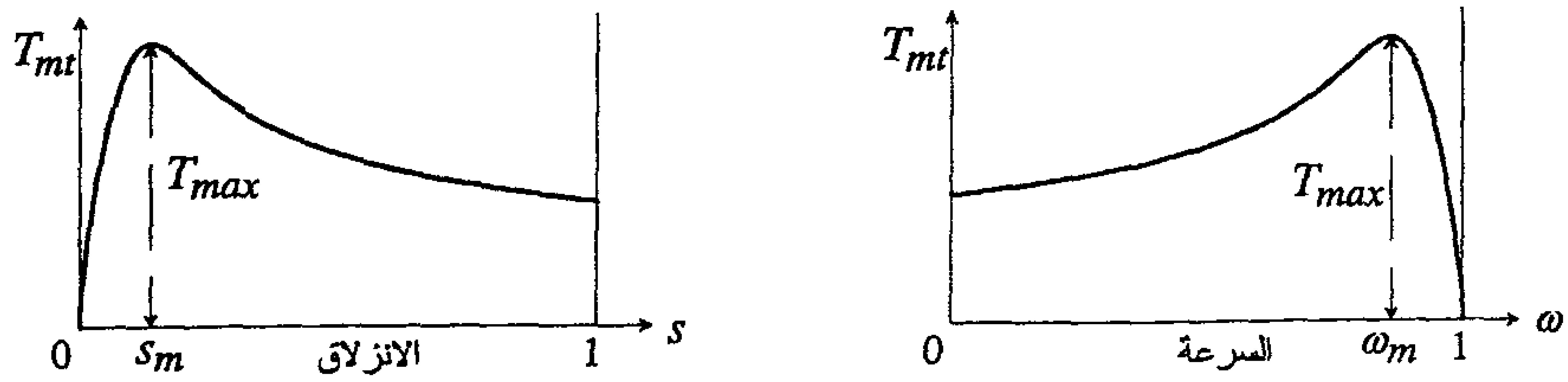
$$I_2' = \frac{E_{th}}{\sqrt{(R_{th} + R_2'/s)^2 + (X_{th} + X_2')^2}} \qquad (6.50)$$

6 .7. خاصية العزم للمحرك الحثي.

يمكن من المعادلتين (6.41) و (6.50) التعبير عن معادلة منحني العزم/الانزلاق والتي تمثل خاصية العزم للمحرك الحثي كما يلي:

$$T_{mt} = I_2'^2 R_2'/(s\omega_s) = E_{th}^2 [R_2'/(s\omega_s)] / [(R_{th} + R_2'/s)^2 + (X_{th} + X_2')^2] \quad (6.51)$$

ويتبين من المعادلة (6.51) انه عند السرعة العالية ($s \to 0$) ومن تم ($R_2'/s^2 \to \infty$) حيث يمكن في هذه الحالة اهمال باقي عناصر القوس المربع في المقام. وفي المقابل يتبين عند السرعة المنخفضة ان ($s \to 1$) ومن تم ($X_{th}+X_2'$) >> ($R_{th}+R_2'/s$) حيث يمكن في هذه الحالة اهمال المقاومات داخل القوس المربع في المقام. وعليه يمكن اختصار علاقة العزم/الانزلاق عند القيم الصغرى للانزلاق $T_{mt}(s \to 0)$ وعند القيم الكبرى للانزلاق $T_{mt}(s \to 1)$ وكما هو مبين في الشكل (14) كما يلي:



شكل (14) خاصية العزم للمحرك الحثي.

$$T_{mt}(s \to 0) \approx E_{th}^2 s / (R_2' \omega_s)] \propto s \,, \quad T_{mt}(s=0) = 0 \quad (6.52)$$

$$T_{mt}(s \to 1) \approx E_{th}^2 R_2' / [s\omega_s (X_{th} + X_2')^2] \propto 1/s \quad (6.53)$$

يتضح مما سبق وكما هو مبين في الشكل (14) ان العزم يتحول من التناسب الطردي الى التناسب العكسي مع الانزلاق مما يحتم المرور بقيمة عظمى للعزم. ويمكن الحصول على قيمة الانزلاق s_{tm} التي تحدث عندها القيمة العظمى للعزم باعادة ترتيب المعادلة (6.51) ومساواة تفاضلها بالنسبة للانزلاق بالصفر كما يلي: $[d(u/v)/dx= (vdu/dx-udv/dx)/v^2]$

$$dT_{mt}/ds= (d/ds)\{E_{th}^2(R_2' /\omega_s) /[s_{tm}R_{th}^2+R_2'^2 /s_{tm}+2R_{th}R_2'+ s_{tm}(X_{th} +X_2')^2]\} =0$$

$$= \{0 - (u) [R_{th}^2 - (R_2'/s_{tm})^2 + (X_{th}+X_2')^2]\} / \{v\}^2 = 0 \quad (6.54)$$

$$R_2'/s_{tm} = \sqrt{[R_{th}^2 + (X_{th}+X_2')^2]} \quad (6.55)$$

$$s_{tm} = R_2'/\sqrt{[R_{th}^2+(X_{th}+X_2')^2]} \quad (6.56)$$

ومن الملاحظ امكانية الوصول للمعادلة (6.55) مباشرة بتطبيق نظرية تحويل اعظم قدرة (maximum power transfer) حيث تنقل اعظم قدرة للدوار ومن تم ينتج اعظم عزم عندما تكون مقاومة الاحمال عند الدوار (R_2'/s) مساوية لمعاوقة المصدر $[R_{th}+j(X_{th}+X_2')]$. وبالتعويض من المعادلة (6.56) في المعادلة (6.51) نحصل على القيمة العظمى للعزم كما يلي:

$$D = \sqrt{[R_{th}^2+(X_{th}+X_2')^2]} = R_2' /s_{tm}\ ,\ \ s_{tm} = R_2'^2/D$$

$$T_{max} = (E_{th}^2/\omega_s)(R_2' /s_{tm}) / [(R_{th} + R_2' /s_{tm})^2 + (X_{th} +X_2')^2]$$

$$= (E_{th}^2/\omega_s)\, D\ / [(R_2' /s_{tm})^2 + 2R_{th}R_2'/s_{tm} + D^2]$$

$$= (E_{th}^2/\omega_s)D/(D^2+ 2R_{th}D + D^2)=(E_{th}^2/\omega_s) / 2(R_{th}+ D)$$

$$= (E_{th}^2/2\omega_s) /\{R_{th}+ \sqrt{[R_{th}^2+(X_{th}+X_2')^2]}\} \quad (6.57)$$

ويمكن من المعادلات (6.51) و (6.55) التعبير عن عزم البدء عندما تكون $s = 1$ وشرط الحصول على قيمته العظمى كما يلي:

$$T_{mst} = (E_{th}^2/\omega_s)R_2' / [(R_{th}+R_2')^2+(X_{th}+X_2')^2] \quad (6.58)$$

$$s_{tm} = 1 \Rightarrow R_2' = \sqrt{[R_{th}^2+(X_{th}+X_2')^2]} \quad (6.59)$$

ولايمكن لشرط المعادلة (6.59) ان يتحقق الا باضافة مقاومة خارجية الى دائرة الدوار وهذا غير ممكن الا مع الدوار الملفوف.

8.6 اختبارات المحرك الحثي.

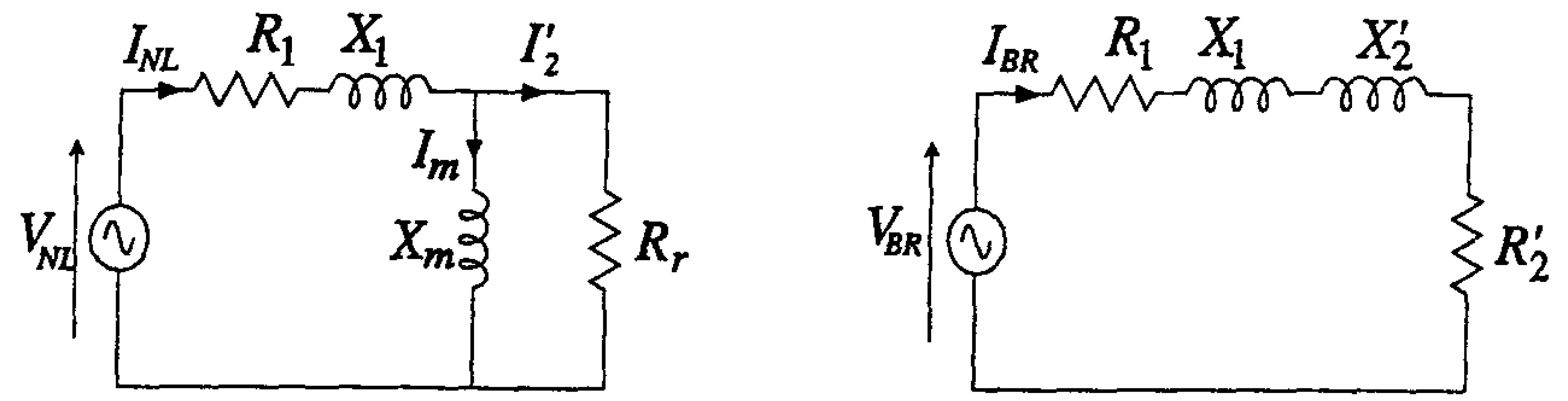
يعطي المحرك الحثي مثالاً واضحاً لصعوبة الحصول على معاملات الدائرة المكافئة للآلة في ضو عدم سهولة الوصول الى ثوابت الدائرة وتغير بعضها مع ظروف التشغيل والتحميل. وبينما يمكن قياس بعض معاملات الدائرة المكافئة للمحرك الحثي مباشرة بواسطة القياسات البسيطة التي تجرى عند اطراف الآلة، فإنه لايمكن تعيين البعض الآخر الا على سبيل التقريب. وتقاس مقاومة لفائف الساكن (ولفائف الدوار الملفوف) ببساطة باستخدام مصدر تيار مستمر عند درجة حرارة مناسبة.

كما يمكن فى حالة محرك الدوار الملفوف استخدام مصدر تيار متردد لقياس نسبة التحويل من الساكن الى الدوار (E_1/E_2) ونسبة التحويل من الدوار الى السكن (E_2/E_1) ومن تم الحصول على متوسط نسبة عدد اللفات الفعالة بين الساكن والدوار من العلاقة $a=\sqrt{[(E_1/E_2)(E_2/E_1)]}$. ويتطلب تعيين باقي معاملات الدائرة المكافئة للمحرك الحثي اجراء الاختبارات التالية:

اختبار اللاحمل.

يجرى اختبار اللاحمل بفصل الحمولة الميكانيكية عن الدوار وتطبيق الجهد المقنن على اطراف الساكن حيث سيدور الدوار في هذه

الحالة بسرعة قريبة جداً من سرعة التزامن ليكون الانزلاق صغير جداً وتكون مقاومة الدوار $R_r=R_2'/s_{nl}$ كبيرة جداً. وبذلك يكون تيار الدوار صغير جداً ، كما يمكن أهمال مفاعلة الدوار لكونها صغيرة جداً مقارنة بمقاومة الدوار عند اللاحمل. ووفقاً لدائرة *IEEE* المكافئة للمحرك الحثي يمثل الفقد في مقاومة الدوار R_r الفقودات الدورانية P_r والفقد في لفائف الدوار والذي عادة ما يهمل لكونة صغير جداً في هذه الحالة. وبذلك ستضم الدائرة المكافئة لاختبار اللاحمل معاوقة الساكن على التوالي مع كل من مقاومة الدوار R_r ومفاعلة المغنطة X_m على التوازى كما في الشكل (15).



دائرة اختبار اللاحمل   دائرة اختبار الاعاقة

شكل (15) دوائر اختبار اللاحمل والاعاقة للمحرك الحثي.

وتمثل القدرة الداخلة في هذه الحالة الفقد الدوراني P_r والفقد في مقاومة الساكن. واذا كان الجهد والتيار والقدرة الداخلة عند اطراف الساكن V_{nl} و I_{nl} و P_{nl}، لكل طور على الترتيب، يمكن حساب كل من الفقد الدوارني ومفاعلة المغنطة كما يلي:

$$Z_{nl} = (R_1+jX_1) + jR_rX_m / (R_r+jX_m) = R_{nl} + jX_{nl}$$

$$R_r>>X_m \Rightarrow X_{nl}=X_1+R_r^2X_m / (R_r^2 +X_m^2) \approx X_1 + X_m \qquad (6.60)$$

$$P_r = P_{nl} - I_{nl}^2R_1 \text{ , } R_{nl} = P_{nl} / I_{nl}^2, \; Z_{nl} =V_{nl} /I_{nl} \qquad (6.61)$$

$$X_{nl} = \sqrt{(Z_{nl}^2 - R_{nl}^2)}, \qquad X_m = X_{nl} - X_1 \qquad (6.62)$$

اختبار الدوار المعاق.

في اختبار الدوار المعاق يمنع دوران الدوار ويطبق جهد صغير على اطراف الساكن يسمح بتدفق تياره المقننة، حيث لا توجد فقودات ميكانيكية في هذه الحالة ويمكن اهمال فقد الحديد وتيار المغنطة لكون جهد الساكن صغير جداً مقارنة بمقنن الجهد. وعليه يمكن حذف فرع المغنطة والحصول على الدائرة المكافئة لاختبار الدوار المعاق ($s=1$) كما في الشكل (15) حيث تمثل القدرة الداخلة في هذه الحالة فقد النحاس P_c. واذا كان الجهد والتيار والقدرة الداخلة عند اطراف الساكن V_{br} و I_{br} و P_{br}، لكل طور على الترتيب، يمكن حساب كل من فقد النحاس ومعاوقات الساكن والدوار للمحرك كما في المعادلات التالية مع ملاحظة الحاجة لتعديل معاملات الدوار لاخذ انخفاض التردد في الاعتبار عند الدوران.

$$Z_{br} = V_{br} / I_{br} = R_{br} + jX_{br}, \quad P_c = P_{br} \tag{6.63}$$

$$R_{br} = P_{br} / I_{br}^2 = R_2' + R_1 \Rightarrow R_2' = R_{br} - R_1 \tag{6.64}$$

$$X_{br} = \sqrt{(Z_{br}^2 - R_{br}^2)} = X_2' + X_1 \Rightarrow X_2' \approx X_1 \approx X_{br} / 2 \tag{6.65}$$

6 .9. كفاءة المحرك الحثي.

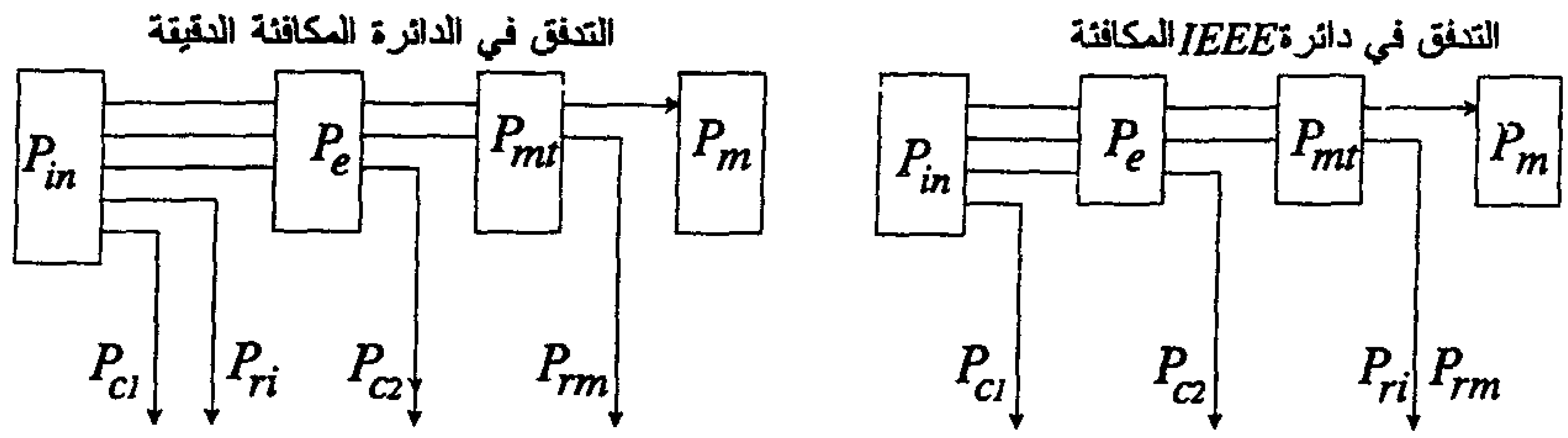
يتطلب حساب المحرك الحثي كأداة للتحويل الكهروميكانيكي للطاقة معرفة الفقودات الكهربائية والميكانيكية والمغناطيسية. وبينما يمكن حساب الفقودات الكهربائية التى تسمى بفقودات النحاس في كل من لفائف الساكن P_{c1} ولفائف الدوار P_{c2} من معاملات الدائرة المكافئة للمحرك أو يتم الحصول عليها من نتائج اختبار الاعاقة، فإنه لابد من معرفة نتائج اختبار اللاحمل للحصول على الفقودات الدورانية P_i التي تشتمل على

الفقودات الميكانيكية P_{rm} (وتمثل فقودات الاحتكاك واضطراب الهواء) والفقودات المغناطيسية التي تسمى بفقودات الحديد P_{ri} وتمثل فقودات التخلف المغناطيسي والتيار الدوامي. وبمعرفة القدرة الداخلة P_{in} وصافي القدرة الخارجة P_m والقدرة المفقودة P_{loss} يمكن حساب الكفاءة η بواحدة من الصيغ التالية:

$$\eta = P_m / P_{in}\,, \qquad P_m = P_{in} - P_{loss} \tag{6.66}$$

$$\eta = (P_{in} - P_{loss}) / P_{in} = P_m / (P_m + P_{loss}) \tag{6.67}$$

ويمكن تتبع تدفق القدرة في المحرك الحثي من القدرة الداخلة P_{in} الى القدرة الخارجة P_m من مخطط تدفق القدرة المبين في الشكل (16) حيث تمثل P_e قدرة التغرة الهوائية التي تساوي صافي القدرة التي تعبر التغرة من الساكن الى الدوار ويمكن الحصول عليها بطرح فقودات الساكن (فقد الحديد P_{ri} وفقد النحاس في لفائف الساكن P_{c1}) من القدرة الداخلة. وتشمل P_e فقد النحاس في لفائف الدوار P_{c2} والقدرة الميكانيكية الكلية P_{mt} والتي تضم صافي القدرة الخارجة P_m والفقودات الميكانيكية P_{rm}. ومن الجدير بالملاحظة ان فقد الحديد في الدوار غالباً ما يهمل بسبب صغر تردد الدوار في حالات التشغيل الاعتيادية.



شكل (16) تدفق القدرة والفقودات في المحرك الحثي.

واذا كانت زاوية الطور بين تيار وجهد اطراف الساكن φ يمكن حساب الكفاءة عند الاحمال وقيم الانزلاق المختلفة كما يلي:

$$P_{in} = V_1 I_1 \cos\varphi , \; P_{c1} = I_1^2 R_1 \qquad (6.68)$$

$$P_e = I_2'^2 R_2' / s , \quad P_{c2} = I_2'^2 R_2' = sP_e \qquad (6.69)$$

$$P_{mt} = P_e - P_{c2} = I_2'^2 R_2'(1-s)/s = (1-s)\,P_e \qquad (6.70)$$

$$P_{loss} = P_{c1} + P_{c2} + P_r = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2' + P_r \qquad (6.71)$$

$$P_m = P_e - P_{c2} - P_r = P_{mt} - P_r = I_2'^2 R_2'(1-s)/s - P_r \qquad (6.72)$$

وبالتعويض عن P_{loss} و P_m من المعادلتين (6.71) و (6.72) في المعادلة (6.67) والاختصار يتم الحصول على الكفاءة كما يلي:

$$\eta = [I_2'^2 R_2'(1-s)/s - P_r] / [I_2'^2 R_2'(1-s)/s - P_r + I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2' + P_r] \qquad (6.73)$$

$$= [I_2'^2 R_2'(1-s)/s - P_r] / [I_2'^2 R_2'/s + I_1^2 R_1] \qquad (6.74)$$

وباهمال جميع الفقودات عدا الفقد الاومي في الدوار يمكن الحصول على الكفاءة المثالية (الداخلية) من المعادلة (6.73) كما يلي:

$$\eta_i = 1 - s \qquad (6.75)$$

وتمثل الكفاءة المثالية η_i التى تعكس كفاءة دائرة الدوار نسبة القدرة الميكانيكية الى قدرة الثغرة الهوائية وهي اكبر من الكفاءة الفعلية لاهمالها لبعض الفقودات، ولكنها تبين اهمية خفض الانزلاق لتحقيق مطلب رفع كفاءة المحرك الحثي. ولذلك نجد ان المحركات الحثية عادة ما يتم تشغيلها قريباً من سرعة التزامن وبانزلاق منخفض جداً في حالات التشغيل الاعتيادية.

10.6 بدء حركة المحرك الحثي.

يمكن من المعادلتين (6.50) و (6.51) التعبير عن تيار وعزم الحمل للمحرك I_{st} و T_{st} عند البدء من السكون $s=1$ كما يلي:

$$I_{st} = E_{th} / \sqrt{[(R_{th} + R_2')^2 + (X_{th} + X_2')^2]} \qquad (6.76)$$

$$T_{mt} = I_2'^2 R_2' / (s\omega_s), T_{st} = I_{st}^2 R_2' / (\omega_s) = T_{mt} (I_{st} / I_2')^2 s \qquad (6.77)$$

ومن الواضح ان تيار البدء الذي يسحبه المحرك عند التوصيل المباشر بالمصدر يتناسب طردياً مع جهد المصدر وعكسياً مع المعاوقة المكافئة لدائرة المحرك. ومن الدائرة المكافئة للمحرك يتبين ان المحرك يعتبر في حالة قصر عند البدء لكون المقاومة المكافئة للحمل الميكانيكي $R_2'(1-s)/s$ تساوي صفر مما يجعل تيار البدء يمثل تيار قصر قد يبلغ اربعة الى ثمانية اضعاف تيار الحمل المقنن للمحرك. وكذلك يتبين من المعادلة (6.77) ان عزم الحمل عند البدء يعتمد على تيار البدء ومقاومة لفائف الدوار حيث يؤدى خفض تيار البدء الى هبوط عزم البدء مقارنة بعزم الحمل المقنن وهو امر غير مرغوب فيه في الغالب.

ونظراً لأن ديناميكا الكتلة الدوارة للمحرك (وخصوصاً عند البدء تحت الحمل) تتطلب زمن طويل قد يتجاوز عشرات الثواني للوصول قريباً من السرعة الاعتيادية للمحرك فتستمر حالة القصر التي يتعرض لها المحرك اثناء البدء لفترة ليست بالقصيرة. وينتج عن ذلك تراكم كميات حرارة كبيرة في لفائف المحرك بسبب الارتفاع الزائد في درجة حرارة اللفائف نتيجة لتيار القصر. كما يجدر بالذكر ان تيار البدء الكبير الذي يسحبة المحرك قد يتسبب في هبوط جهد كبير في خط التغذية يقلل من عزم البدء ويزيد من طول الفترة اللازمة لبلوغ السرعة المقننة كما يؤثر سلباً على المحركات والاحمال الاخرى المتصلة بالخط. وتعتمد طرق بدء حركة المحرك على نوعة

وقدرته وظروف الحمل عند البدء وقدرة المصدر، **ومن اهم هذه الطرق ما يلي:**

1 - الربط المباشر على الخط: ويشترط لها الا يكون هبوط جهد عند اطراف المحرك كبيراً والا يؤثر تيار البدء على استقرار شبكة التغذية واداء احمالها الاخرى. وبينما يميز هذه الطريقة رخص تكلفتها فهي لا تصلح سوى للمحركات الصغيرة.

2 – خفض جهد الاطراف: وتهدف لخفض تيار البدء بخفض جهد الاطراف عند البدء وهي تستخدم اساساً مع محركات القفص السنجابي حيث تكون لفائف الدوار مقفلة ويلجاء الى التحكم في تيار البدء من اطراف الساكن، وتضم الطرق التالية:

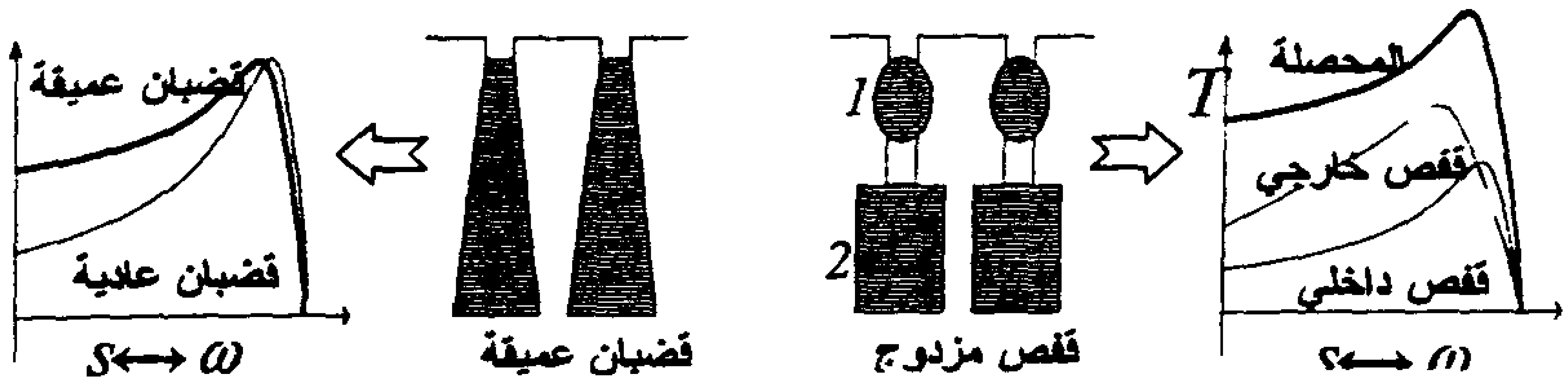
(أ) استخدام مقاومة بدء على التوالي مع الساكن لخفض تيار البدء ويميزها تحسين معامل القدرة ومن تم زيادة عزم البدء ويعيبها القدرة المفقودة في مقاومة البدء مما يقصر استخدامها على المحركات الصغيرة فقط.

(ب) استخدام محول ذاتي متغير المأخذ للبدء بجهد منخفض يرفع تدريجياً ليصل الجهد المقنن عند بلوغ السرعة المقننة، وتستعمل مع المحركات الكبيرة ويميزها نعومة البدء نتيجة للزيادة التدريجية في الجهد، بينما يعيبها تكلفة تجهيزاتها.

(ج) استخدام توصيلة نجمة/مثلث حيث توصل لفائف الساكن نجمة عند البدء وتقلب الى مثلث اثناء التشغيل وينتج عنها خفض جهد وتيار البدء الى 57.7٪ وعزم البدء الى الثلث. ويميز هذه الطريقة الاكثر استخداماً رخص تكلفتها.

3 – رفع مقاومة الدوار: وتستخدم اساساً لبدء حركة محرك الحلاقات الزلاقة وتهدف الى زيادة المعاوقة المكافئة لدائرة المحرك لخفض تيار البدء كما يتضح من المعادلة (6.76) ورفع عزم البدء كما يتضح من المعادلة (6.77) لتقليل زمن البدء. وتبين المعادلة (6.58) ان القيمة العظمى لعزم البدء تتناسب طردياً مع مقاومة الدوار حيث يمكن باضافة مقاومة خارجية مناسبة على التوالي مع لفائف الدوار (عن طريق الحلقات الزلاقة) تعديل مقاومة الدوار الكلية لتعطي القيمة العظمى للعزم عند البدء كما يتبين من المعادلة (6.58). كما يمكن خفض المقاومة الخارجية تدريجياً مع ارتفاع سرعة المحرك لتعطي القيمة العظمى للعزم طوال فترة التسارع وتخرج المقاومة الخارجية كلياً من دائرة الدوار عند بلوغ السرعة الاعتيادية.

4 – استخدام قضبان خاصة: تزيد ظاهرة تأثير القشرة (skin effect) من مقاومة الموصل للتيار المتردد مقارنة بمقاومة التيار المستمر وفقاً لشكل وحجم الموصل وتردد التيار. وبذلك يمكن استغلال انخفاض تردد الدوار من قيمة تردد الساكن (50 Hz) عند البدء الى 2-4 Hz عند السرعة المقننة في خفض مقاومة دوار القفص السنجابي ذاتياً مع تسارعة. ويتم ذلك باستخدام قضبان خاصة تبدئ مقاومة فعالة اكبر عند تردد عالي (البدء) منها عند التردد المنخفض (سرعة مقننة)، كما في دوار القضبان العميقة (deep bar) ودوار القفص المزدوج (double-cage) المبينة في الشكل (17). وهنا يمكن تصميم القضبان للحصول على نفس ميزات رفع مقاومة الدوار الملفوف عند بدء محرك الحلقات الزلاقة كما سبق.



شكل (17) القضبان العميقة والقفص المزدوج.

11.6 التحكم في سرعة المحرك الحثي.

يوفر المحرك الحثي ثلاثي الطور بوجه عام متطلبات المحرك ثابت السرعة عند تغذيته من مصدر ثابت الجهد وثابت التردد، حيث تكون سرعته الاعتيادية قريبة جداً من سرعة التزامن ولاتنخفض الا بنسبة بسيطة جداً عند زيادة الحمل ضمن المقنن. ولكن الكثير من التطبيقات الصناعية للمحركات تتطلب توفير عدة سرعات في المحرك بل وتغير السرعة بشكل متواصل احياناً، حيث جرت العادة على استخدام محركات التيار المستمر لمثل هذه التطبيقات لما توفره من خصائص متعددة ومرونة للتحكم. ولكن تكلفة محركات التيار المستمر وحاجتها المستمرة لصيانة المبدل والفرش ادى الى تطوير نبائط الكترونية قادرة على توفير وسائل مناسبة ورخيصة للتحكم في سرعة المحرك الحثي مما جعل المحركات الحثية مناسبة في انظمة السرعة المتغيرة. ويمكن من المعادلتين (6.52) و (6.53) التعبير تقريبياً عن العزم عند القيم الكبرى والصغرى للانزلاق كما يلي:

$$T_{mt}(s\to 0) \propto E_{th}^2 s / (\omega_s R_2') \propto s \quad , T_{mt}(s\to 1) \propto E_{th}^2 R_2'/(s\omega_s) \propto 1/s \qquad (6.78)$$

وكما يتضح من المعادلة (6.78) يمكن التحكم في خاصية العزم/الانزلاق للمحرك الحثي بتغيير سرعة التزامن بتعديل عدد الاقطاب أو تردد المصدر لتغيير ω_s، أو عن طريق تغيير جهد المصدر أو تغيير مقاومة الدوار وكمايلي:

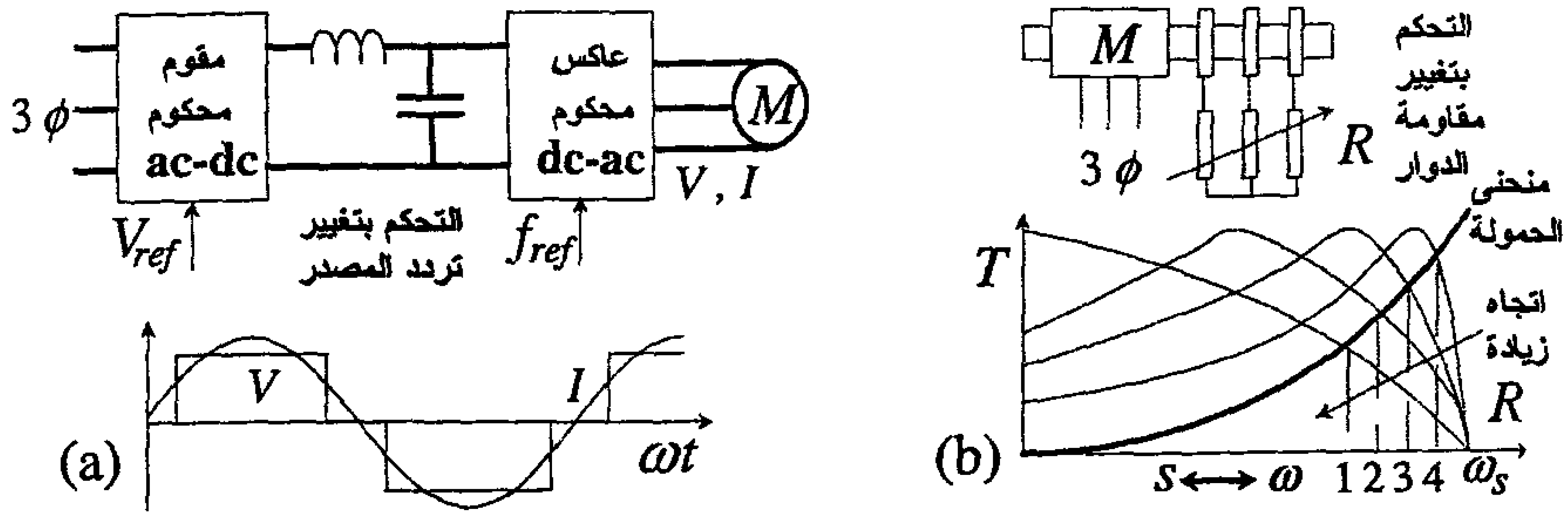
1 – تغيير عدد الاقطاب: ويمكن ان يتم ذلك بتغيير توصيلة لفائف الساكن الموزعة ليتم تشكيلها في عدد اقطاب مناسب حيث عادة ما تمكن هذه الطريقة من تغير عدد ازواج الاقطاب بنسبة 1:2 لتوفر سرعتين تزامنيتين بنسبة 2:1 وتعد محركات القفص السنجابي الاكثر ملائمه لهذه الطريقة لقدرة دوارها على العمل بأي عدد من الاقطاب. ويعيب هذه الطريقة ان السرعة لاتتغير الا في خطوات متقطعة وانها تتطلب توزيع لفائف الساكن بشكل معقد يجعلها باهضة التكاليف.

2 – التحكم في تردد المصدر: وتتطلب هذه الطريقة وسيلة مناسبة لتغيير تردد خط التغذية حيث يبين الشكل (18a) منظومة حديثة بسيطة للتحكم في تردد التغذية تضم دائرة المقوم الذي يغير التيار من متردد الى مستمر، متصلة عن طريق مرشح بدائرة العاكس الذي يعيد التيار من مستمر الى تيار متردد متغير التردد. وبالرغم من انخفاض تكلفة مثل هذه المنظومات مع الزمن لكن يعيبها الشكل الموجي الغير جيبي تماماً لجهد التغذية مما يقلل من كفاءة الآلة ويزيد من مشاكل التوافقيات.

3 – التحكم في جهد المصدر: حيث يمكن تغيير الجهد ثلاثي الطور باستخدام المحولات الذاتية أو منظمات الجهد الالكترونية. وبينما يوفر المحول الذاتي جهد متغير ذو موجة جيبية سليمة فهو يعتبر اكثر كلفة من منظمات الجهد الالكترونية التي تعطي جهد متردد متغير ذو شكل موجي لاجيبي يضم نسب عالية من التوافقيات تتسبب في الكثير من المشاكل للمحرك وخط التغذية مما يكاد يقصر استخدامها على المحركات الصغيرة التي تدير احمال بسيطة مثل المراوح والمضخات.

4 – تغيير مقاومة دائرة الدوار: وتعود هذه الطريقة الى امكانية التحكم في عزم ومن تم سرعة المحرك ذو الحلقات الزلاقة بادخال مقاومة متغيرة على التوالي مع دائرة الدوار حيث يمكن الحصول على منحنيات العزم

المبينة في الشكل (18b). وفي بعض الحالات قد لايكون ضبط المقاومة بالطرق اليدوية مناسباً للتحكم الدقيق في السرعة مما يستوجب استخدام منظومات الكترونية لتغير المقاومة بشكل ادق. ويعيب طرق التحكم بمقاومة الدوار انخفاض كفاءة المحرك عند السرعات المنخفضة بسبب كبر الانزلاق، ولكنها تمتاز ببساطتها ورخصها مما يجعلها الاكثر استخداماً.



شكل (18) وسائل التحكم في سرعة المحرك الحثي.

12.6 أمثلة محلولة

1 - محرك حثي 3-ϕ، 4-pole، يضم ساكنه 36 شقب ولفائفه قصيرة الخطوة وباع الملف 8 شقوب؛ احسب كل من: معامل التوزيع ومعامل الخطوة ومعامل اللفائف. [0.96, 0.985, 0.945]

الحل :

$2P=4$,$S=36$,$y_c=8$slot

$\tau= s/2p =36/4= 9$slot , $\alpha= 180/\tau=180/9=20^o$ slot angle ,$m=S/(No.phase*2P)=36/(4*3)=3$ slot/pole/phase.

$\beta=(\tau-y)\ \alpha=(9-8)*20=20^o$

$$K_d =\frac{\sin\frac{m\alpha}{2}}{m\sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\frac{3*20}{2}}{3\sin\frac{20}{2}}=0.96$$

Kp= cos β/2 =cos 20/2=0.985

Kw=Kd*Kp=0.945

2 – محرك حثي 3-ϕ، 4-pole، 460 V، 15 hp، 60 Hz، 1728 rpm، فقوداته الميكانيكية 750 W، يبدل قدرة كاملة؛ احسب: (أ) القدرة المبدولة، (ب) قدرة التغرة الهوائية، (ج) فقد النحاس في الدوار.
[11.94 KW, 12.4375 KW, 497.5 W]

الحل:

2P=4 ,v=460 v , Pm=15 hp=15*746=11.19 KW/3ph

Pmt=Pm+Prm=11.94 KW/3ph

Ns=60f/p=1800 RPM

S=ns-n/ns=0.04

Pmt=Pe(1-S) Pe=Pmt/(1-S)=12.4375 KW/3ph

Pcu2=SPe=497.5 W/3ph

3- محرك حثي 3-ϕ، 8-pole، 750 RPM ويضم ساكنه 72 شقب بها لفائف موزعة قصيرة باع ملفاتها 7 شقوب، وبكل شقب 12 موصل. فأذا كانت ملفات كل طور موصلة على التوالي وفيض التغرة الهوائية 60 mWb لكل قطب. احسب جميع معاملات اللفائف والتردد وعدد الملفات لكل طور وق.د.ك الساكن. [0.96, 0.94, 0.9024,50 Hz, 144,3 KV]

4 - محرك حثي 3-ϕ، 6-pole، 415 V، 50 Hz يضم ساكنه 72 شقب بها لفائف موزعة قصيرة الخطوة تم لفها ليقل باع ملفاتها شقبين عن الخطوة الكاملة وبكل شقب 9 موصلات. فاذا كانت السرعة 950 RPM، احسب جميع معاملات اللفائف وتردد الدوار وسرعة انزلاقه وفيض التغرة الهوائية لكل قطب. [0.9577, 0.9659, 0.925,2.5 Hz, 50 RPM,0.01 Wb]

5 - محرك حثي $3\text{-}\phi$، 4-pole، 460 V، 100 hp، 60 Hz يبدل عزم مقنن عند انزلاق 5%؛ احسب: (أ) سرعتي التزامن والمحرك، (ب) تردد الدوار وسرعة الانزلاق، (ج) سرعة مجال الدوار بالنسبة لكل من الدوار والساكن ومجال الساكن، (د) ق.د.ك الدوار اذا كانت نسبة التحويل 2. [1800 rpm, 1710 rpm, 3 Hz, 90 rpm, 90 rpm, 1800 rpm, 0 rpm, 6.64 V/ph]

6 - محرك حثي $3\text{-}\phi$، 4-pole، 60 Hz، يسحب عضوه الدوار قدرة 120 KW عند تردد 3 Hz، فقودات النحاس والحديد في العضو الساكن 3 KW و 1.7 KW على الترتيب، والفقودات الميكانيكية 2 KW؛ اهمل فقد حديد الدوار واحسب: (أ) سرعة الدوار والفقد في لفائفه، (ب) القدرة الخارجة عند عمود الدوران، (ج) الكفاءة. [1710 rpm, 6 KW, 112 KW, 89.7 KW]

7 - محرك حثي $3\text{-}\phi$، 6-pole، 10 hp، 220 V، 60 Hz ثوابت دائرته المكافئة: $R_1=0.294\ \Omega$، $R_2'=0.144\ \Omega$، $X_1=0.503\ \Omega$، $X_2'=0.209\ \Omega$، $X_m=13.25\ \Omega$ وفقوداته الدورانية 403 W. فأذا كان الانزلاق 2%، احسب سرعة دوار المحرك والمعاوقة الكلية بين اطراف الساكن وتيار الساكن وتيار مركبة الحمل وصافي القدرة الخارجة والكفاءة.

[1176RPM,6.7636∠32.27°Ω,18.78 A,16.30A,5.34 KW,86.55%]

8 - محرك حثي $3\text{-}\phi$، 2-pole، 50 hp، 480 V، 50 Hz يسحب عند الحمل التام 60 A بمعامل قدرة 0.85 متأخر. فقودات النحاس في الساكن وفي الدوار عند الحمل التام 2.0 KW و 0.7 KW على الترتيب، وفقودات الحديد والفقودات الميكانيكية 1.8 KW و 0.6 KW على الترتيب. احسب القدرة الداخلة وقدرة الثغرة الهوائية

والانـزلاق وسـرعة الـدوار وصـافي القـدرة الخارجـة والكفـاءة. [42.4 KW, 38.6 KW, 0.018,2946 RPM, 37.3 KW,87.97%]

9 - محـرك حثـي 3-φ، 6-pole، 2200 V، 60 Hz نتـائج اختبـار اللاحمل: 2200 V، 4.5 A، 1.6 KW، 60 Hz، نتـائج اختبـار الدوار المعاق: 270 V، 25 A، 9 KW، 15 Hz، متوسط مقاومة التيـار المسـتمر للسـاكن المقاسـة 2.8 Ω؛ احسـب: (أ) الفقـودات الدورانيـة، (ب) معـاملات دائـرة IEEE المكافئـة، (ج) جهـد تيفـنن ومقاومة ومفاعلة تيفنن لدائرة IEEE المكافئة. [$R_2' = 2\ \Omega$, $X_1 = 7.96\ \Omega$, $X_m = 273.04\ \Omega$, $V_{th} = 1232.09$ V/ph, $R_{th} = 2.63\ \Omega$, $X_{th} = 7.96\ \Omega$]

10- محـرك حثـي 3-φ، 4-pole، 460 V، 1740 rpm، 60 Hz، معـاملات دائرتـه $R_1 = 0.25\ \Omega$، $R_2' = 0.2\ \Omega$، $X_1 = X_2' = 0.5\ \Omega$، $X_m = 30\ \Omega$ وفقوداته الدورانية 1.7 KW. استـخدم الـدائرة المكافئـة التقريبية للمحـرك واحسـب: (أ) تيـار وعـزم البـدء المباشـر، (ب) انـزلاق وتيار الحمل التـام، (ج) معامـل قـدرة وعـزم وكفـاءة الحمـل التـام، (د) انـزلاق العـزم الاعظـم والعـزم الاعظـم. [250.29 A, 186.57 Nm, 3.33%, 44.23 A, 0.94 lag, 168.12 Nm, 87.7%, 19.63%, 431.68 Nm]

11- محـرك حثـي 3-φ، 6-pole، 460 V، 60 Hz دواره ملفـوف ويـدير حمل ثابت 100 Nm بسرعة 1140 RPM. فـأذا طلـب خفـض السـرعة الى 1000 RPM احسب الانزلاق عنـد السـرعتين والمقاومـة الخـارجيـة في الدوار واللازمة لخفض السرعة اذا كانت مقاومة لفائف الـدوار 0.2 Ω، والفقودات الدورانية مهملة والنسبة الفعالـة للفـات السـكن/الـدوار واحـد. [0.05, 0.167 , 0.468 Ω]

الفصل السابع

الآلات التزامنية ثلاثية الطور

الآلات التزامنية ثلاثية الطور

1.7 مقدمة.

تعد الآلات التزامنية (synchronous machines) من انواع آلات التيار المتردد ومن اهم ما يميزها أن عضوها الدوار يدور بسرعة ثابتة في الحالة الثابتة ولا تتغير مع الحمولة كما في الآلات الاخرى. وتعتمد سرعة الآلة على تردد تيار منظومة القوى المتصلة بها حيث يؤدي تدفق التيار المتردد في لفائف المنتج الى انشاء مجال مغناطيسي دوار في الثغرة الهوائية يدور بسرعة تعرف بالسرعة التزامنية (synchronous speed) والتي يحددها تردد التيار. وتتم اثارة لفائف المجال في الآلة التزامنية بتيار مستمر لينشئ مجال مغناطيسي ثابت بالنسبة للدوار ويدور معه بسرعة التزامن، أي بنفس سرعة المجال المغناصيسي الدوار للفائف المنتج، وبذلك تتزامن ق.د.م الدوارة للمنتج وق.د.م المجال ويدوران معاً بالسرعة التزامنية.

وتستخدم الآلات التزامنية اساساً كمولدات (generators) حيث يعرف المولد التزامني بالمناوب (alternator). وتستخدم المناوبات الضخمة بمقننات قد تصل الوف الميجا- فولت- امبير MVA في محطات القوى الكهربائية بانواعها الحرارية التي تعمل بالوقود التقليدي، والنووية التي تعمل بالطاقة النووية، والمائية التي تدار بطاقة تدفق المياه عبر المساقط والسدود المائية. وهي بذلك تمثل اداة تحويل الطاقة الكهربائية الرئيسية في العالم اليوم ويتوقع ان تظل كذلك في العقود المقبلة على الرغم من التقدم في تقنيات التحويل المباشر للطاقات المتجددة مثل تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية. وتستخدم المولدات التزامنية في وحدات التوليد الاحتياطي التى تدار بمكائن الديزل بقدرات اقل قد تصل عشرات او مئات الكيلو- فولت- امبير KVA. وفي احجامها الاصغر جداً تستخدم الآلات التزامنية كمولدات للكهرباء في السيارات والعربات.

ومن اهم ما يميز الآلات التزامنية عند استخدامها كمحركات ثبوت سرعتها وعدم تغيرها مع الحمل الميكانيكي كما هو الحال في المحركات الحثية ومحركات التيار المستمر، حيث لا تتغير سرعة المحرك التزامني الا بتغيير تردد تيار مصدر التغذية. وتستخدم المحركات الضخمة بقدرات قد تصل مئات الكيلو- وات KW في التطبيقات الصناعية التي تتطلب سرعات ثابتة مثل مكائن الدلفنة في مصانع الحديد والصلب وبعض المضخات في محطات توليد الكهرباء. وتستخدم المحركات التزامنية الصغيرة بقدرات قد لاتصل الوات في الساعات والمؤقتات والعدادات وما الى ذلك من الاجهزة التي تتطلب الدوران بسرعات ثابتة. وفي بعض التطبيقات الخاصة تجرى الابحاث لتطوير محركات تزامنيه خطية للاستخدام لدفع القاطرات الكهربائية السريعة. ولكون معظم نظم التحريك في الصناعة تعمل بسرعات متغيرة فإن استخدام المحركات التزامنية اقل انتشاراً من المحركات الحثية.

ومعظم الآلات التزامنية المستخدمة في الحياة العملية هي آلات ثلاثية الطور مع وجود تطبيقات محدودة للآلات ثنائية الطور. ويضم المنتج للآلة التزامنية ثلاثية الطور لفائف المنتج ثلاثية الطور الموزعة تماماً كما في المحركات الحثية ثلاثية الطور. وفي المقابل يضم عضو المجال لفائف احادية الملف مركزة تغذى بالتيار المستمر كما في عضو المجال لآلات التيار المستمر. وتوضع لفائف المنتج في الغالبية العظمى من الآلات التزامنية في العضو الساكن كما في المحركات الحثية بينما توضع لفائف المجال في الدوار خلافاً لآلات التيار المستمر. **ويميز وضع لفائف المنتج في الساكن ولفائف المجال في الدوار ما يلي:**

1 – ستكون اطراف (نهايات) لفائف المنتج ثلاثية الطور وبما فيها موصل الحياد (التعادل) ساكنة وبالتالي يمكن توصيلها بمنظومة القوى بشكل مباشرة دون الحاجة لوسائل توصيل متحركة. ولكون تيار

ملفات المنتج عادةً ما تكون اعلى بكثير جداً فإن استخدام توصيلات ساكنة بدلاً من توصيلات ذات اسطح تلامس متحركة سيضمن نقل التيارات العالية بسهولة ويمنع مشاكل الشرر والتوصيل الناتجة عن نقل تيار ضخم عن طريق اسطح متلامسة متحركة.

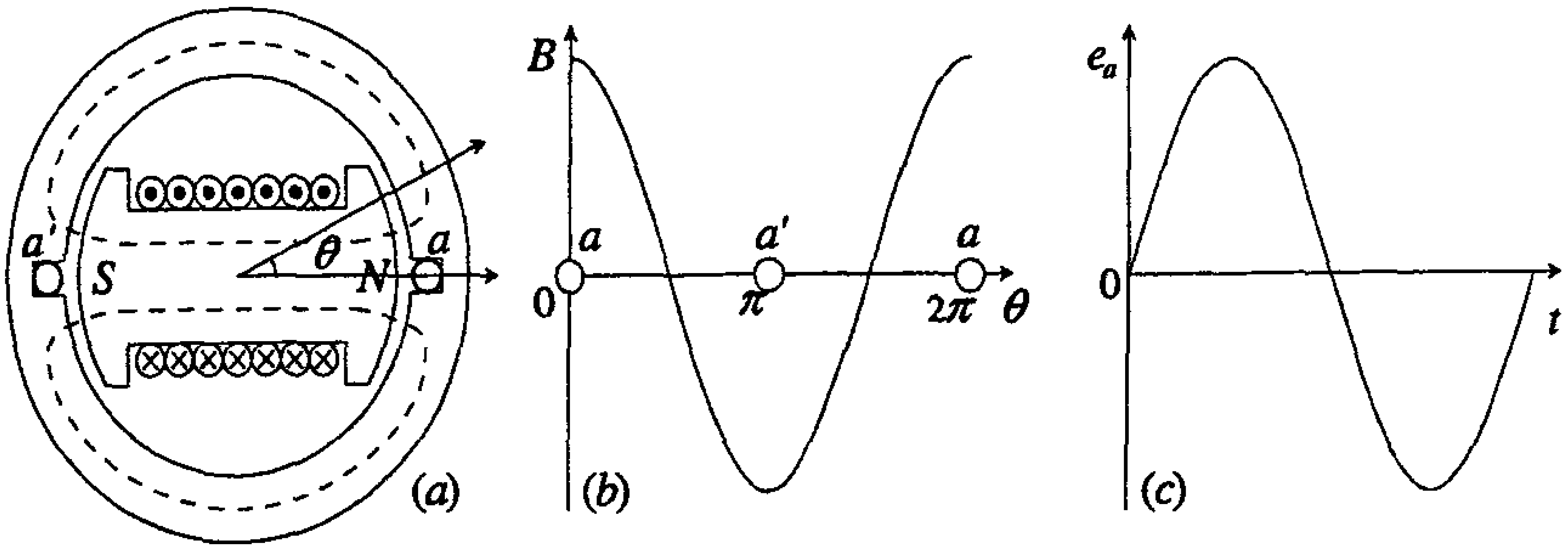
2 – لا تتطلب لفائف المجال ذات الجهود والقدرات المنخفضة الا نقطتين لتغذيتها بالتيار المستمر مقارنة باربعة للفائف المنتج ثلاثية الطور. ويمكن نقل التيار المستمر الى لفائف المجال في الدوار ببساطة بواسطة حلقين منزلقتين تلامسهما فرشاتين ثابتتين. وفي اكثر الآلات التزامنية الكبيرة الحديثة تم الاستغناء كلياً عن الحلقتين المنزلقتين باستخدام مولدات اثارة ذات منتج مثبت على نفس عمود دوران الآلة التزامنية يغذي لفائف المجال المثبتة معه على نفس العمود مباشرةً.

3 – ستكون متطلبات العزل للفائف المنتج ذات الجهد العالي والتيار العالي اقل عند وضعها في العضو الساكن حيث لا توجد حاجة لجعلها اكثر تماسكاً ميكانيكياً لمقاومة قوى الطرد المركزى اذا ما وضعت في الدوار. ولنفس العمق ستوفر الشقوب في السطح الداخلي للساكن حيز اكبر للموصلات وعوازلها مقارنةً بالسطح الخارجي للدوار.

2.7 اسس عمل الآلات التزامنية.

يمكن توضيح اسس عمل الآلة التزامنية بالنظر للمولد التزامني البسيط المبين في الشكل $(1a)$ حيث يضم العضو الدوار لفائف مجال تغذى بتيار مستمر عن طريق فرشاتين وحلقتين منزلقتين مكونةً قطبين مغناطيسيين شمالي N وجنوبي S متقابلين قطرياً. ويضم العضو الساكن ملف منتج وحيد ضلعيه a و a' موضوعين في شقبين متقابلين قطرياً في المحيط الداخلي للساكن ومتصلين على التوالي بوصلات طرفية. ويعمل المولد بتدوير عضوه الدوار بسرعة ثابتة بواسطة محرك اولي حيث ينشئ تيار

الاثـارة فـيض يعـبر الثغـرة الهوائيـة ويعـود عـبر مسـارين نصـف دائـريين في الساكن كما يبينه الخط المتقطع في الشكل $(1a)$.



شكل (1) توزيع كثافة فيض المجال و ق.د.ك مولد تزامني بسيط.

ويبين الشكل $(1b)$ توزيع كثافة فيض المجال B في الثغرة الهوائية كدالة في الزاوية الفراغية θ حول محيط الثغرة الهوائية. ولتبسيط دراسة الآلة يمكن تقريبياً تمثيل موجة كثافة الفيض بمركبتها الاساسية الجيبية واهمال مركبات توافقياتها الفردية الصغيرة. وبتدوير الدوار تعبر موجة الفيض ضلعي الملف a و a' لتحتث فيها ق.د.ك e بشكل موجي مماثل للتوزيع الفراغي لكثافة الفيض B كما في الشكل $(1c)$ حيث تكون ق.د.ك المنتج دالة في الزمن تمر بدورة موجية كاملة في كل دورة ميكانيكية للعضو الدوار ذو القطبين. وبذلك تكون e مترددة وترددها بالدورة في الثانية او الهيرتز (Hz) يساوي سرعة العضو الدوار، أي ان التردد الكهربائي لدائرة المنتج يكون متزامناً مع السرعة الميكانيكية للدوار والى ذلك تعود تسمية الآلات التزامنية.

وكثيراً ما تضم الآلة التزامنية اكثر من زوج من الاقطاب حيث يبين الشكل $(2a)$ مخطط مولد بسيط ذو اربعة اقطاب حيث يتم توصيل ملفات المجال لتكون الاقطاب شمالية وجنوبية على التناوب حول محيط الدوار. ويتضح من الشكل $(2b)$ انه باتمام دورة ميكانيكية كاملة حول المنتج تكمل موجة كثافة الفيض دورتين موجتين. وتضم لفائف المنتج الملفين $a1$،

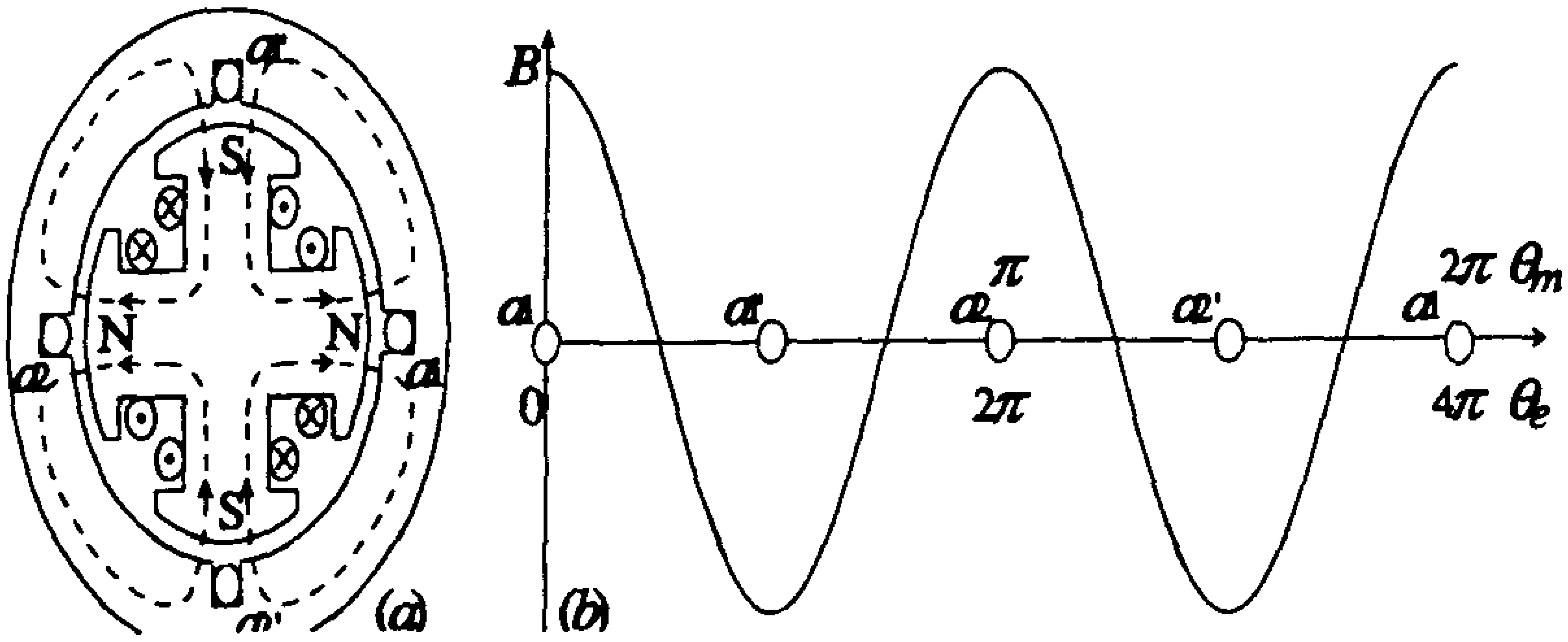
$a1'$ و $a2$، $a2'$ متصلين على التوالي حيث اتساع الملف يساوى خطوة قطب. وبدوران الدوار تعبر موجة الفيض اضلع ملفي المنتج لتحتث فيها ق.د.ك e تمر بدورتين موجيتين كاملتين لكل دورة للدوار ويكون ترددها f (Hz) ضعف سرعة الدوران بالدورة في الثانية.

وبوجود عدة ازواج من الاقطاب يكفي التركيز على زوج واحد لكون الظواهر المتعلقة بالازواج الاخرى تمثل تكراراً لظواهر ذلك الزوج. ولذا يفضل التعبير عن الزوايا بالدرجات e^{o} او الزوايا النصف قطرية e^{rad} الكهربائية بدلاً من الوحدات الميكانيكية m^{o} و m^{rad} حيث الطول الموجي لموجة الفيض والزاوية الفراغية حول الثغرة لكل زوج من الاقطاب $360\ e^{o}$ او $2\pi\ e^{rad}$. وتمر ق.د.ك ملف المنتج بدورة موجية كاملة كلما عبره زوج اقطاب لتكمل عدد ازواج الاقطاب من الدورات في كل دورة ميكانيكية. واذا كان عدد ازواج اقطاب الآلة p وسرعتها n دورة في الدقيقة (RPM) يمكن التعبير عن القيم الكهربائية للزاوية θ والتردد f والتردد الزاوي ω للدورة الموجية بدلالة الزاوية θ_m والسرعة n والسرعة الزاوية ω_m الميكانيكية كما يلي:

$$\theta = p\theta_m \tag{7.1}$$

$$f = \frac{pn}{60}\ (\text{Hz}) \tag{7.2}$$

$$\omega = p\omega_m\ (e^{rad}/s) \tag{7.3}$$



شكل (2) توزيع كثافة الفيض لمولد تزامني بسيط ذو 4 اقطاب.

3 .7. بنية وتصنيف الآلات التزامنية.

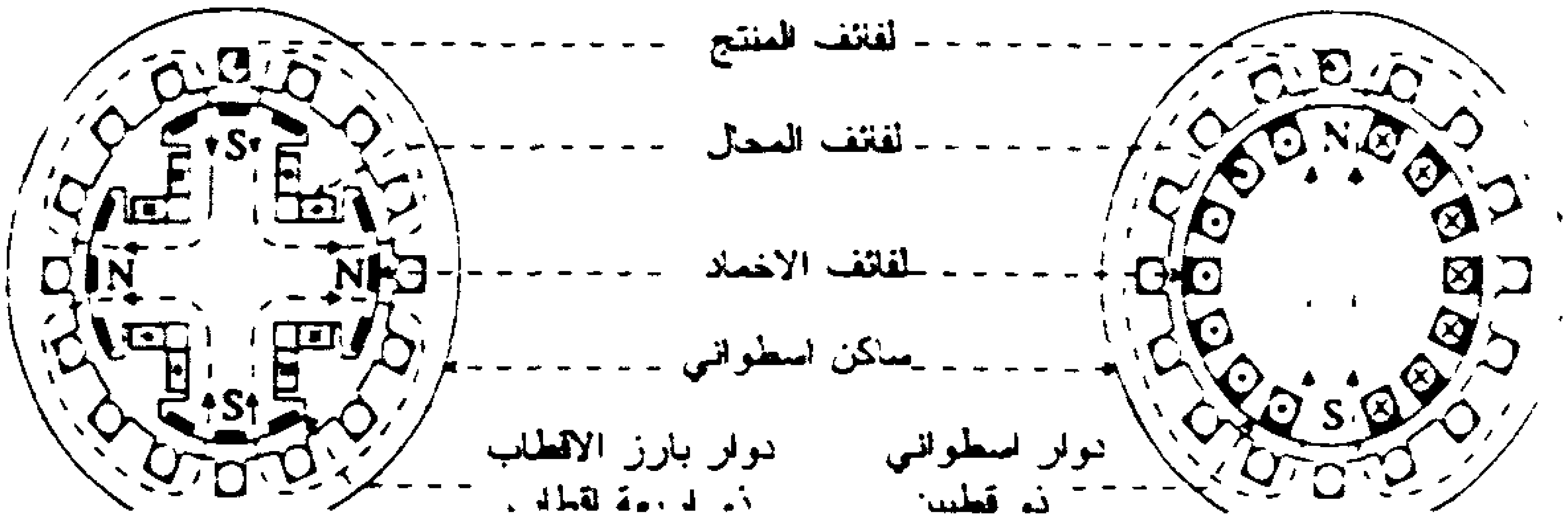
يبين الشكل (3) المعالم الاساسية لبنية الآلة التزامنية حيث يضم العضو الساكن لفائف المنتج ويصنع من شرائح اسطوانية مجوفة من مادة فيرومغناطيسية محفور في سطحها الداخلي شقوب طولية لحمل اللفائف. ويهدف استخدام الشرائح الى تقليل فقودات الحديد الناتجة عن التيارات الدوامية والتخلفية المغناطيسية والتي تعود بدورها الى تعرض الساكن للمجالات المترددة. ومن الجدير بالذكر ان بنية العضو الساكن في الآلات التزامنية وترتيب لفائفه يشبه تماماً تكوين وترتيب لفائف العضو الساكن في الآلات الحثية حيث تصنع لفائف المنتج من ملفات جاهزة. وتوضع الملفات بشكل فردي في شقوب الساكن لتربط بالشكل المطلوب ليضم المنتج لفيفة واحدة لكل طور في الآلة متعددة الاطوار للتوفير في تكلفة صنع وصيانة الآلة.

وخلافاً للمحركات الحثية حيث يبنى لب العضو الدوار في الآلات التزامنية من مادة فيرومغناطيسية مصمتة (وليس من شرائح) ويعود ذلك لكون لفائف الاثارة في الدوار تحمل تياراً مستمراً ولا يشبكها مجالاً متردداً. وقد يكون الدوار الذي يضم لفائف المجال ذو اقطاب بارزة ولفائف

مركزة حول هذه الاقطاب كما في الشكل $(3a)$، او اسطواني غير بارزة الاقطاب ذو لفائف موزعة في شقوب حول محيط الدوار لتكوين زوج او اكثر من الاقطاب كما في الشكل $(3b)$. ويتم ترتيب لفائف المجال في الدوار بالشكل المناسب لتنتج مجال مغناطيسي ذو شكل موجي قريب جداً من الشكل الموجي الجيبي. ويعود الاختيار بين العضو الدوار ذو الاقطاب البارزة والعضو الدوار الاسطواني الى تردد التيار وسرعة المحرك الاولي كما تحدد العلاقة بينهما المعادلة (7.2) **بالاضافة الى الاعتبارات الميكانيكية عند التشغيل. وعادةً ما تصنف الآلة التزامنية الى نوعين تبعاً لبنية العضو الدوار وترتيب لفائف المجال وكما يلي:**

1 - آلات الدوار بارز الاقطاب: وتستخدم فيها لفائف مركزة تناسب السرعات المنخفضة حيث عادةً ما يتطلب يضم الدوار عدد كبير من الاقطاب وهو ما يستوجب ان يكون قطر الدوار اكبر من طوله المحوري. ويستخدم هذا النوع كمولدات في محطات القوى الكهرومائية (hydroelectric) حيث يدار المولد بواسطة توربينات مائية منخفضة السرعة لا تتجاوز مئات الدورات في الدقيقة. وتستخدم المحركات بارزة الاقطاب في الصناعات التي تتطلب سرعات ثابتة وبطيئة.

2 - آلات الدوار الغير بارز الاقطاب او الاسطواني: وتستخدم فيها لفائف مجال احادية موزعة في شقوب سطح الدوار الاسطواني وهي تناسب السرعات العالية حيث عادةً ما يتطلب الامر استخدام عدد قليل من الاقطاب مما يجعل قطر الدوار اقل كثيراً من طوله المحوري. ويستخدم هذا النوع كمولدات توربينية (turbo-alternator) حيث يدار المولد بواسطة توربينات بخارية او غازية عالية السرعة تبلغ عدة آلاف من الدورات في الدقيقة (RPM).



الشكل (3) بنية ولفائف الآلة التزامنية.

وقد تضم بعض الآلات التزامنية الكبيرة لفائف اضافية مقصورة تسمى لفائف الاخماد (damper winding) تكون على شكل قضبان قفصيه توضع محورياً في شقوب في اوجه اقطاب الدوار بارز الاقطاب. وفي آلات الدوار الاسطواني تكون لفائف الاخماد على شكل اقفاص اسطوانية شبيهة بالقفص السنجابي للمحرك الحثي وتضع في نفس شقوب لفائف المجال لتكون الاقرب لسطح الدوار. وفي الحالة الثابتة المستقرة يدور دوار الآلة ومعه لفائف الاخماد بسرعة التزامن الثابتة، أي بنفس سرعة المجال الدوار في الثغرة الهوائية مما يجعل لفائف الاخماد ساكنة بالنسبة لمجال الثغرة ولن تحثت فيها اي ق.د.ك وهو ما يجعلها هامدة وتياراتها وجهودها اصفاراً. وعند تعرض الآلة لاضطراب ينحرف بسرعة دوارها عن السرعة التزامنية ستحثث فيه ق.د.ك ويسري فيها تيار ينتج عزم تدوير مضاد للعزم الذي تسبب في تغير سرعة وتردد تيار منتج الآلة. وقد يستفاد من اللفائف القفصية للبدء الذاتي لحركة الآلة لتعمل حينها كما في المحركات الحثية.

والغالبية العظمى من الآلات التزامنية المستخدمة في الحياة العملية ثلاثية الطور يتم ترتيب ملفات منتجها لتكوين لفيفة واحدة لكل طور حيث تكون الازاحة الزاوية بين محاور لفائف الاطوار 120° كهربائية. وعند دوران المولد التزامني ثلاثي الطور يحثث مجال لفائف المجال (الدائرة مع العضو الدوار) جهود ثلاثية الطور في لفائف المنتج (الساكنة في العضو الساكن) لتغذية الحمولة الكهربائية للمولد. وفي المقابل تنتج التيارات ثلاثية

الطور المتدفقة في لفائف منتج المحرك التزامني ثلاثية الطور ق.د.م دوارة يؤدي تفاعل مجالها مع مجال لفائف المجال في الدوار الى انتاج العزم المستمر اللازم لادارة دوار المحرك.

4.7 ق.د.م لفائف المنتج ثلاثية الطور.

يتحدد اداء الآلات الكهربائية اساساً على المجالات المغناطيسية الناشئة عن تدفق التيارات في لفائفها المختلفة حيث يعد التحليل الدقيق لتوزيع المجالات المغناطيسية غاية في التعقيد ويتطلب تبسيط هذا التحليل بعض الافتراضات التقريبية وهي:

1 – اهمال التشبع المغناطيس في حديد الآلة ومن تم افتراض خطية الخصائص المغناطيسية.

2 – اهمال ممانعة مسارات الفيوض المغناطيسية خلال حديد العضوين الساكن والدوار للآلة.

3 – افتراض التوزيع الجيبي لمجالات ق.د.م في الثغرة الهوائية واهمال مركبات التوافقيات.

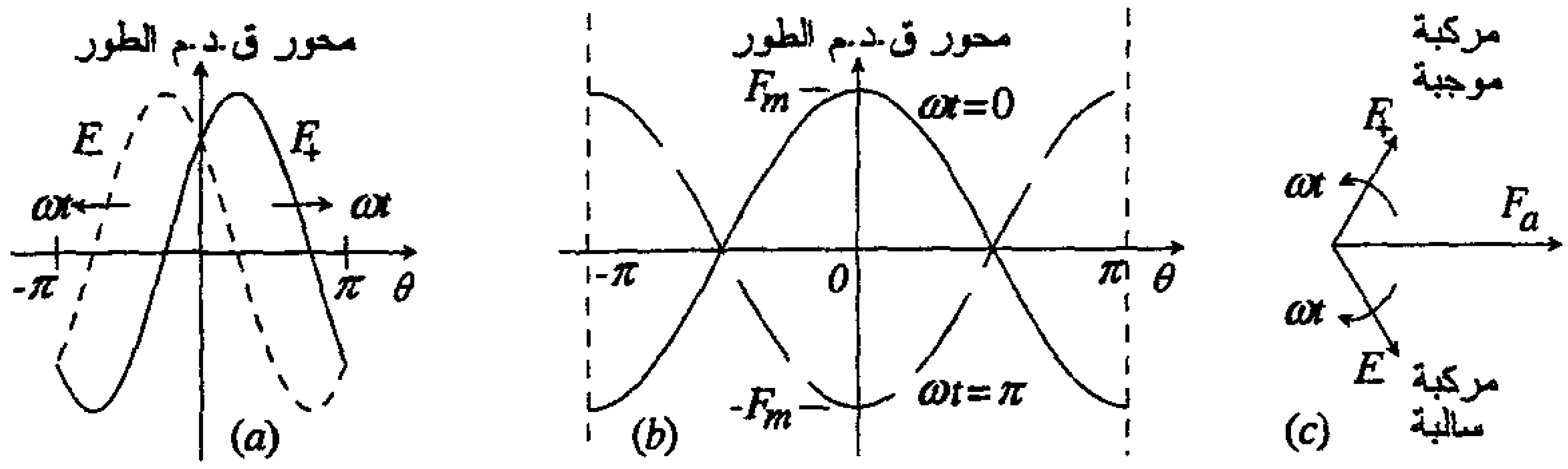
4 – افتراض انتظام الثغرة الهوائية وتحليل فيوض الآلة بارزة الاقطاب في محورين متعامدين.

ويتطلب فهم نظرية عمل آلات التيار المتردد متعددة الاطوار دراسة طبيعة موجة ق.د.م الناتجة عن اللفائف متعددة الاطوار حيث يكفى لفهم ذلك دراسة الآلة ذات القطبين او التركيز على زوج واحد من اقطاب الآلة التي تضم p زوج من الاقطاب. وتوجد ثلاث موجات ق.د.م في الآلة التزامنية للاخذ في الاعتبار وهي ق.د.م لفائف المجال المثارة بتيار مستمر في الدوار وقد سبق بيانها في الشكلين (1) و (2)، وق.د.م لفائف المنتج متعددة الاطوار في الساكن، ومحصلة كل من ق.د.م المجال والمنتج. وللتبسيط يمكن البداية

بدراسة ق.د.م منتج آلة احادية الطور يضم ساكنها ملف واحد ضلعاه a و a' كما في الشكل (4). وبفرض ان عدد اللفات الفعالة للفائف الطور N لفة والتيار المار فيها متردد ذو موجة جيبية يمكن التعبير عن التيار اللحظي وق.د.م اللحظية للطور $\mathcal{F}_a$ عند أي نقطة في الثغرة الهوائية تبعد θ درجة عن محور الطور a كما يلي:

$$i_a=I_m\cos\omega t, \mathcal{F}_a=Ni_a\cos\theta=F_m\cos\theta\cos\omega t, F_m=NI_m \qquad (7.4)$$

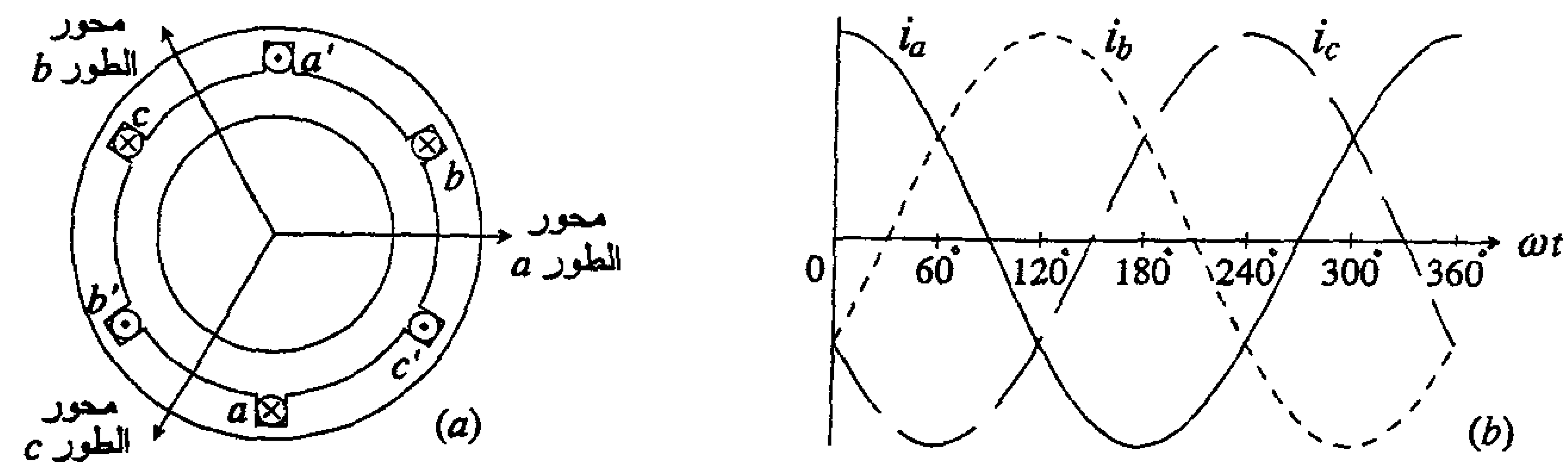
$$\mathcal{F}_a = \frac{1}{2}F_m\cos(-\omega t+\theta)+\frac{1}{2}F_m\cos(\omega t+\theta) = \frac{1}{2}\mathbf{F_m\cos(\omega t-\theta)}+\{\frac{1}{2}F_m\cos(\omega t+\theta)\} \qquad (7.5)$$



شكل (4) ق.د.م لفائف منتج احادي الطور.

وتبين المعادلة (7.5) ان ق.د.م المنتج احادي الطور ذات توزيع جيبي نابض على محور الملف كما في الشكل ($4a$)، وتضم موجتين بنصف السعة العظمى تدور احدهما (مكتوبة بخط عريض) في اتجاه موجب والاخرى (بين قوسين معقوفين) في اتجاه سالب بسرعة ω. ويبين الشكل ($4b$) محصلة ق.د.م النابضة بينما يبين الشكل ($4c$) التمثيل الطوري لمركبتي ق.د.م المنتج ومحصلتهما. ويتضح من ذلك ان تيار منتج الآلات احادية الطور تنتج محصلة ق.د.م نابضة وغير دوارة ولن تؤدي الى انتاج عزم مستمر. ولهذا السبب يتم عند تصميم الآلة احادية الطور استخدام بعض الوسائل لتضخيم مركبة ق.د.م الموجبة لاكبر قدر ممكن وتصغير المركبة السالبة لاقل قدر ممكن وهو ما يجعل الآلة تعمل كآلة ثنائية الطور وان لم تكن ذات اطوار متزنة.

وفي المنتج الآلة ثلاثية الطور يتم ترتيب لفائف الاطوار a، b، c لتكون الازاحة بين محاورها $120\ e^\circ$ كما في الشكل ($5a$). واذا كان عدد اللفات الفعال لكل طور N ولفائف المنتج تحمل تيار ثلاثي الطور متزن كما في الشكل ($5b$)، يمكن التعبير عن تيار وق.د.م الاطوار ومحصلتها $\mathcal{F}$ على أي محور في الثغرة الهوائية عند ازاحة θ عن محور الطور a كما يلي:



شكل (5) ترتيب وتياراتها للفائف منتج آلة بسيطة ثلاثية الطور.

$$i_a = I_m \cos \omega t, \mathcal{F}_a = N i_a \cos\theta = \hat{F}\cos\theta\cos\omega t, \hat{F} = N I_m \tag{7.6}$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t\text{-}120^\circ), \mathcal{F}_b = N i_b \cos(\theta\text{-}120^\circ) = \hat{F}\cos(\theta\text{-}120^\circ)\cos(\omega t\text{-}120^\circ) \tag{7.7}$$

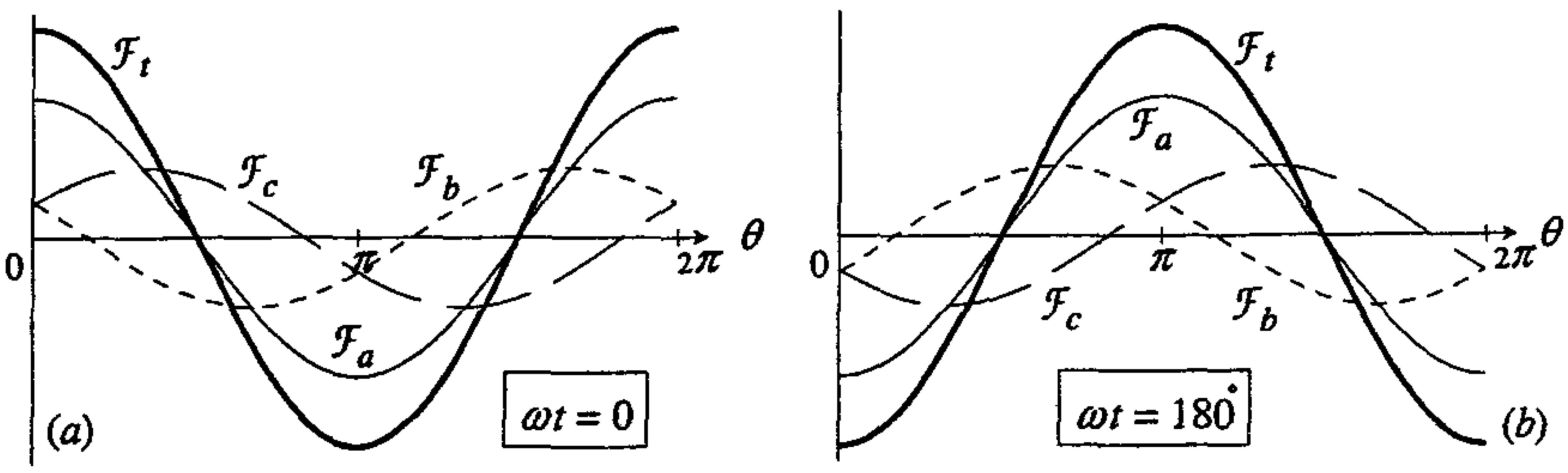
$$i_c = I_m \cos(\omega t\text{-}240^\circ), \mathcal{F}_c = N i_c \cos(\theta\text{-}240^\circ) = \hat{F}\cos(\theta\text{-}240^\circ)\cos(\omega t\text{-}240^\circ) \tag{7.8}$$

$$\mathcal{F}_t = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c = \hat{F}\,[\cos\omega t\cos\theta + \cos(\omega t\text{-}240^\circ)\cos(\theta\text{-}240^\circ) + \cos(\omega t\text{-}240^\circ)\cos(\theta\text{-}240^\circ)]$$

$$= \tfrac{1}{2}\hat{F}\,[\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta\text{-}240^\circ) + \cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta\text{-}480^\circ)]$$

$$= \tfrac{3}{2}\hat{F}\cos(\omega t - \theta) + \{\tfrac{1}{2}\hat{F}\,[\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta\text{-}240^\circ) + \cos(\omega t + \theta\text{-}120^\circ)]\} = F_m \cos(\omega t - \theta) \tag{7.9}$$

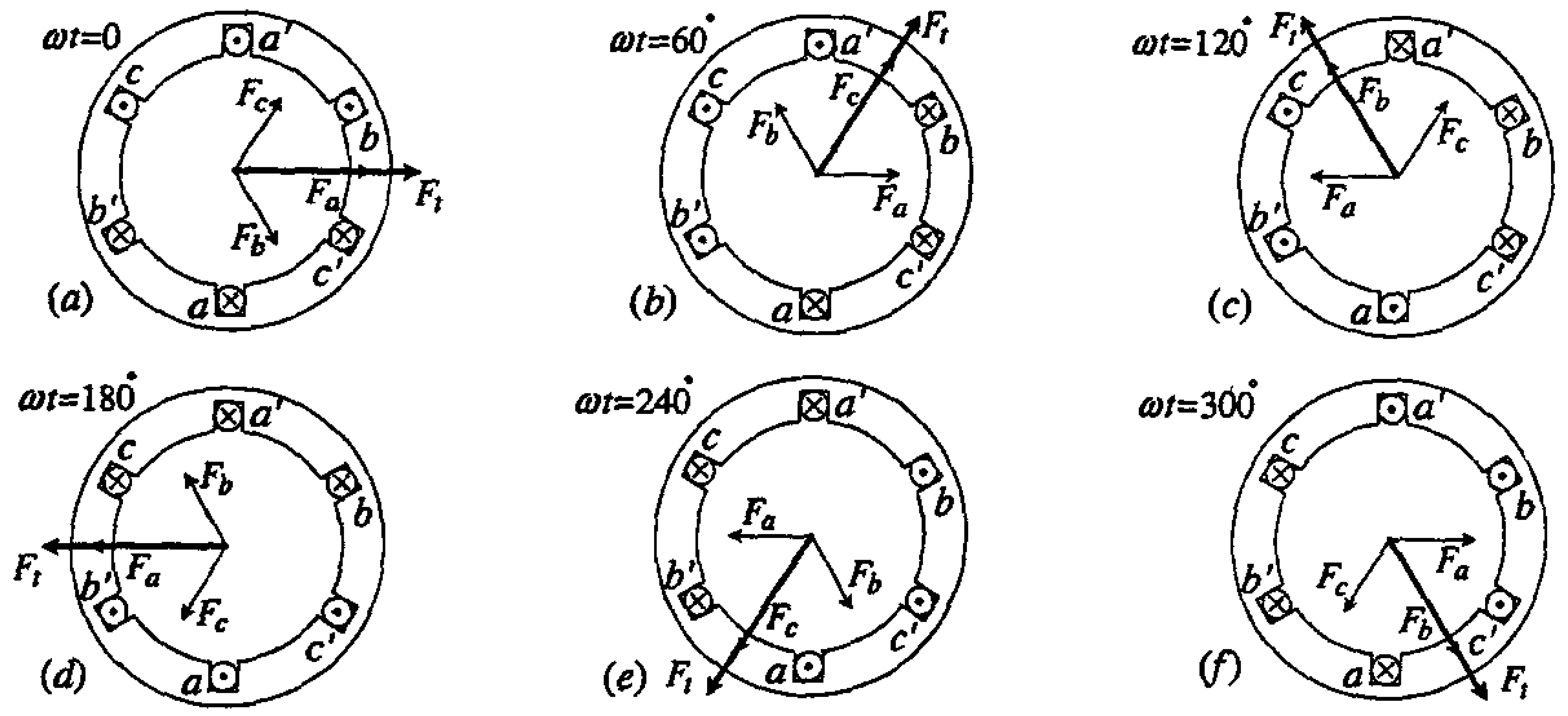
وتبين المعادلات (7.6) الى (7.9) ان ق.د.م كل طور تضم موجتين راحلتين (traveling) تدور احدهما اتجاه في موجب والاخرى في اتجاه سالب. ويتضح من المعادلة (7.9) ان مجموع موجات الاطوار الراحلة في اتجاه سالب (بين القوسين المعقوفين) صفراً ، بينما تدعم موجات الاطوار الراحلة في اتجاه موجب (المكتوبة بخط عريض) بعضها لتعطي ق.د.م دوارة في الاتجاه الموجب. ويمكن اثبات ان تبديل (تيارات) أي اثنين من الاطوار الثلاثة سيقلب اتجاه دوران المجال، أي يقلب اشارة θ في المعادلة (7.9). ويميز ق.د.م الدوارة انها دالة في الزاوية الفراغية θ وهي ذات سعة ثابتة وزاوية طور ωt كدالة خطية في الزمن t. وتضمن الزاوية ωt دوران او ترحال الموجة بالكامل في الثغرة الهوائية بسرعة ω وكما هو مبين في الشكل (6) حيث يتضح ان موجة ق.د.م عند $\omega t=180\ e^\circ$ تمثل الموجة عند $\omega t=0$ وقد تحركت بزاوية $180\ e^\circ$ حول الثغرة الهوائية.



شكل (6) شكل موجة ق.د.م الدوارة للفائف منتج ثلاثي الطور حول الثغرة عند اوقات مختلفة.

ويمكن ايجاد ق.د.م الدوارة برسم ق.د.م الاطوار الثلاثة ومحصلتها للتيارات المحددة عند قيم ωt المبينة في الشكل $(5b)$ حيث نجد عند $\omega t=0$ ان $i_a=I_m$ ، $i_b= i_c= -½I_m$ ومن ثم $\mathcal{F}_a=F_m$ ، $\mathcal{F}_b= \mathcal{F}_c=$ $-½F_m$ وكما في الشكل $(7a)$. ويرسم متجهات $\mathcal{F}_b$ و $\mathcal{F}_c$ السالبة في الاتجاه السالب لمحاورهما نجد ان محصلة ق.د.م الاطوار الثلاثة $\mathcal{F}_t$ تمثل

موجة جيبيه تبلغ سعتها $(3/2)F_m$ منطبقة على محور a. وباعادة رسم المتجهات لقيم ωt اخرى بين 0 الى $300\ e^{\circ}$ بخطوة $60\ e^{\circ}$ حول الثغرة، تبين ان محصلة ق.د.م تمثل موجة راحلة ذات سعة ثابتة تدور حول الثغرة يمكن التعبير عنها كما في المعادلة (7.9).



شكل (7) متجه ق.د.م الدوارة للفائف منتج ثلاثي الطور حول الثغرة مع الزمن.

5.7 ق.د.ك المنتج المحتثة اثناء اللاحمل.

يمكن في الآلة ثلاثية الاطوار ذات القطبين تمثيل المجال المغناطيسي الدوار للفائف المنتج F_{ar} بقطبين مغناطيسيين يدوران في الثغرة الهوائية بسرعة التزامن وينتجا مجال ذو توزيع جيبي تقع ذروته على طول محورهما في الثغرة كما في الشكل (6). واثناء اللاحمل تكون $F_{ar}=0$ لعدم تدفق التيار في لفائف المنتج المفتوحة حيث ستمثل ق.د.م لفائف المجال F_f محصلة ق.د.م الثغرة الهوائية F_r التي تنشئ الفيض ϕ_r في نفس اتجاهها. وستعود ق.د.ك المحتثة في لفائف المنتج اثناء اللاحمل E_f الى ق.د.م لفائف المجال فقط. وبتصميم الشكل الهندسي لاوجه الاقطاب المجال وترتيب لفائفها بالشكل المناسب يمكن الحصول على فيض ذو توزيع جيبي في الثغرة الهوائية كما في الشكل (1). وستكون كثافة الفيض ذات كثافة جيبيه b تقع ذروتها B_m

عند محور القطب وتتحدد قيمتها عند أي نقطة حول الثغرة كدالة في الزاوية θ (erad) استناداً لمحور القطب بالمعادلة:

$$b = B_m \sin\theta \tag{7.10}$$

واذا كان نصف القطر الداخلي لساكن آلة ذات p زوج من الاقطاب r وطوله المحورى l يكون طول القوس المقابل لزاوية كهربائية $d\theta$ حول محور القطب $r\ d\theta /p$، وتكون مساحة مقطع الشريحة المقابلة على سطح الساكن $l\ (r\ d\theta /p)$ والفيض $d\phi$ عبرها $b\ (l\ r\ d\theta /p)$. وبذلك يمكن الحصول على القيمة العظمى لفيض الثغرة الهوائية Φ لكل قطب بالتعويض عن b من المعادلة (7.10) وتكامل الفيض $d\phi$ عبر القوس الممتد بين الزاويتين الكهربائيتين 0 الى π حول محور القطب وكما يلي:

$$d\phi = b\ (l\ r\ d\theta /p) = (l\ r\ B_m /p)\ \sin\theta\ \ d\theta \tag{7.11}$$

$$\Phi = \int_0^{\pi} d\phi = \int_0^{\pi} (l r B_m/p) \sin\theta\, d\theta = 2l\ r\ B_m/p \tag{7.12}$$

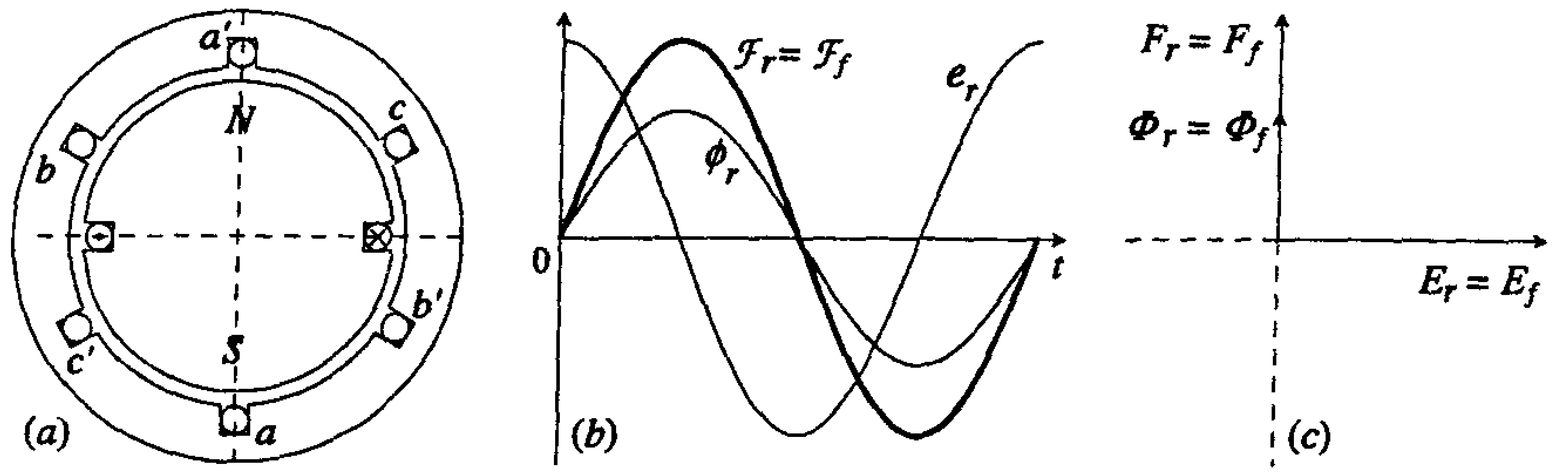
ويكتفى باشتقاق ق.د.ك المحتثة في ملف الطور a فقط حيث لن تختلف عنها ق.د.ك الاطوار b و c الا في ازاحتها الطورية. وبدوران الدوار واقطاب المجال بسرعة كهربائية ω يتغير الفيض الذي يشبك ضلعي ملف الطور a الذين تفصلهما خطوة كاملة ($180\ e^\circ$) وفقاً لجيب الزاوية ωt بين محور القطب والملف بين الصفر عند $\omega t=0$ والذروة عند $\omega t=90^\circ$. واذا كان عدد لفات ملف الطور N لفة يمكن التعبير عن ق.د.م وفيض المجال ϕ_r كموجة جيبية ذروتها Φ ومن تم الحصول من قانون فراداي على ق.د.ك اللحظية e_r المحتثة في ملف الطور a وقيمتها الفعالة E_r كما يلي:

$$\phi_r = \Phi \sin\omega t \tag{7.13}$$

$$e_r = -\ N\ d\phi /dt = -\ (d\ /dt)\ (N\ \Phi \sin\omega t) = -\ \omega N \Phi\ \ \cos\omega t$$
$$= E_m \sin(\omega t - \pi/2) \tag{7.14}$$

$E_m=\omega N\Phi=2\pi f N \Phi$,$E_r=E_m$ /$\sqrt{2}$= $2\pi f N\Phi$ /$\sqrt{2}$= 4.443 f $N\Phi$ (7.15)

ويتضح من المعادلة (7.14) ان ق.د.ك المنتج E_r تسبق محصلة الفيض ϕ_r ومن تم ق.د.م المحصلة F_r بزاوية قدرها $90°$ وكما في الشكل (8). وفي الآلة العملية حيث تستخدم لفائف قصيرة الخطوة موزعة على عدة شقوب لتحسين اداء الآلة تكون ق.د.ك الطور اقل من قيمتها في المعادلة (7.15) للفائف كاملة الخطوة المركزة في شقبين كما في الشكل (8). واذا كانت α الزاوية بين كل شقبين و m عدد الشقوب لكل قطب لكل طور للفائف الموزعة و β الزاوية التي تقل بها خطوة الملف عن خطوة القطب للفائف القصيرة، يمكن اخذ تأثير قصر وتوزيع اللفائف في الحسبان بضرب ق.د.ك المعادلة (7.15) في معامل اللفائف $k_W = k_p\, k_d$ حيث k_p معامل الخطوة و k_d معامل التوزيع (كما تم اشتقاقهما عند دراسة الآلات الحثية) وكما يلي:



شكل (8) ق.د.م وق.د.ك الآلة التزامنية اثناء اللاحمل.

$$E_r = 4.443\ N\Phi\ f k_W = 4.443\ N\Phi\ f k_d\, k_p \qquad (7.16)$$

$$k_p = \cos\frac{\beta}{2}, \quad k_d = \frac{\sin(m\alpha/2)}{m\sin(\alpha/2)} \qquad (7.17)$$

6.7. محصلة ق.د.م والفيض اثناء الحمل.

يتحدد اداء الآلة بالتيار المتدفق في لفائفها المختلفة وق.د.م الناتجة عن هذه التيارات وفيوض الثغرة الهوائية الناشئة عن ق.د.م. وبمعرفة محصلة الفيض يتم ايجاد ق.د.ك المحثثة في اللفائف وبناء معادلة الجهد والدائرة

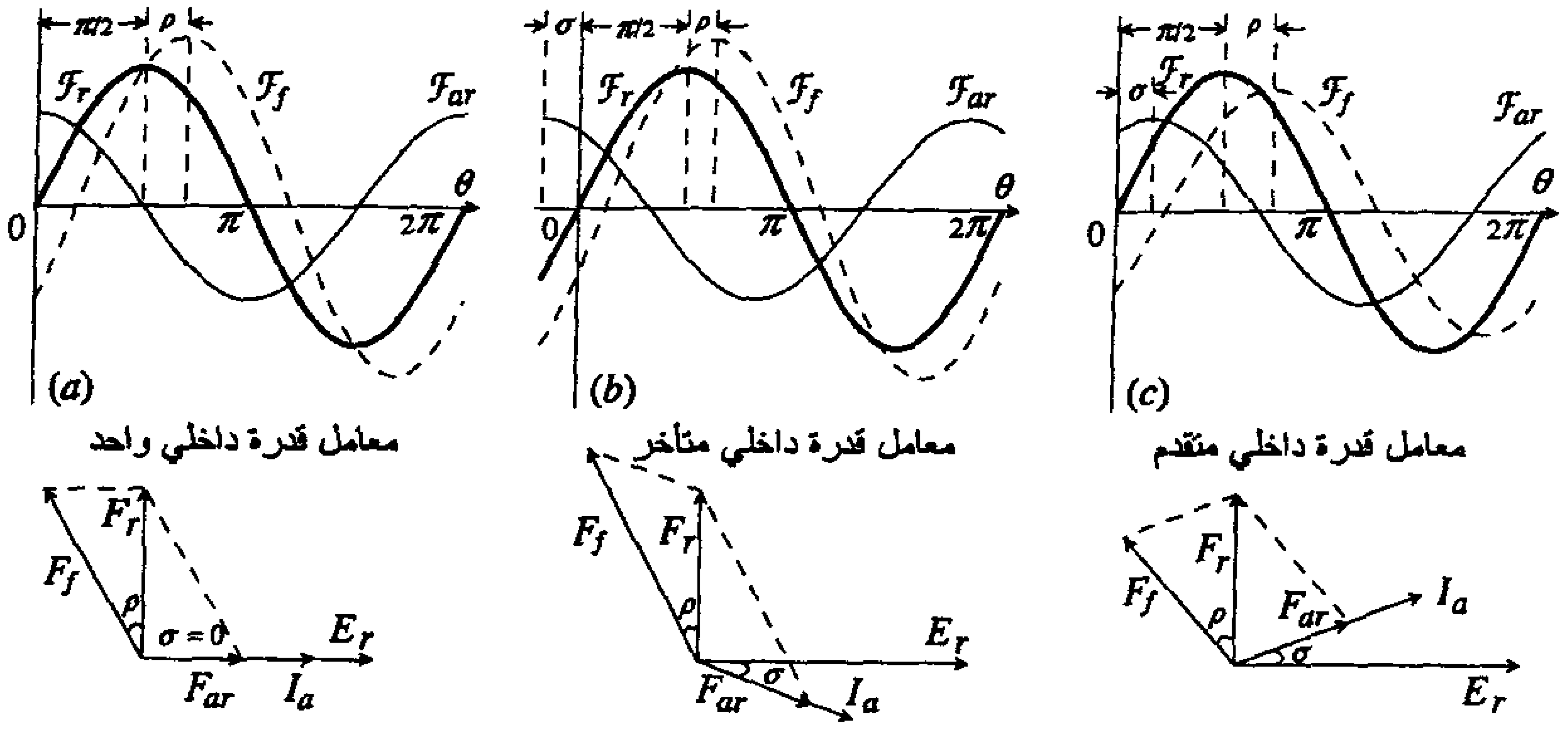
المكافئة ومخططها الطوري لدراسة اداء الآلة. وفي الآلة ثلاثية الطور ذات التيارات المتزنة تدور موجة كثافة الفيض في الحالة الثابتة حول الثغرة الهوائية بسرعة ثابتة بالنسبة للفائف المنتج بحيث يمكن تمثيلها بمتجهات طورية. ويقوم المخطط الطوري للآلة في الحالة الثابتة على الاخذ في الاعتبار بموجات ق.د.م لفائف المجال وق.د.م الدوارة للفائف ثلاثية الطور وكثافات الفيض الناتجة عنها. وفي الآلة ذات الثغرة الهوائية المنتظمة تتناسب كثافة الفيض في كل نقطة في الفراغ حول الثغرة ومن ثم ق.د.ك المحثثة بشكل ثابت مع ق.د.م.

وكما يتم تمثيل الجهود والتيارات المتغيرة جيبياً في نطاق الزمن بمتجهات طورية زمنية، يمكن تمثيل ق.د.م ذات التوزيع الجيبي في الفراغ حول محيط الثغرة بمتجهات طورية فراغية. ويمثل ق.د.م الفراغية متجه مركب مقداره القيمة العظمى ومحوره في اتجاه هذه القيمة ويرتبط بتوزيع ق.د.م في الفراغ بنفس الطريقة التي يتم بها تمثيل التيار بمتجه مركب مقداره القيمة الفعالة للتيار يرتبط بتغير التيار مع الزمن. وتتناسب ق.د.ك المحثثة في ملف المنتج مع مقدار محصلة الفيض في الثغرة الهوائية والسرعة النسبية بين الفيض والملف وتعتمد ازاحتها الطورية على الازاحة الفراغية لموجة الفيض بالنسبة للملف. وبذلك يرتبط متجه ق.د.ك الطوري الزمني مباشرةً بمتجه الفيض الطوري الفراغي.

وبأخذ الافتراضات التقريبية المذكورة في البند (7.4) في الحسبان ستبرز في الثغرة الهوائية عند تحميل الآلة ثلاثة متجهات تمثل ق.د.م لفائف المجال Ff وق.د.م الدوارة للفائف المنتج Far ومحصلتهما Fr. وفي الحالة الثابتة تدور متجهات ق.د.م الثلاثة بسرعة التزامن بازاحة ثابتة بينها وهو ما يسمح بتناولها ككميات طورية مركبة. ويجدر بالذكر ان Far التي تمثل رد فعل المنتج منطبقة طورياً على تيار المنتج Ia، وق.د.ك المنتج Ear تتأخر 90^{o} عن محصلة الفيض ϕr. وفي الآلة التزامنية الاسطوانية تكون الثغرة

الهوائية منتظمة ومتجه الفيض ϕ_r منطبقاً على متجه ق.د.م F_r. وبذلك ستكون الازاحة الطورية بين ق.د.م المنتج F_{ar} ومحصلة ق.د.م الآلة F_r مساوية لزاوية معامل القدرة الداخلية σ بين ق.د.ك المنتج وتيار المنتج.

وعند تشغيل الآلة التزامنية كمولد يغذي حمل معامل قدرة محدد تكون موجات ق.د.م ومخططاتها الطورية كما في الشكل (9). وعند اللاحمل حيث تيار وق.د.م المنتج صفراً ستضم محصلة ق.د.م الآلة ق.د.م المجال فقط $F_r=F_f$. وللحفاظ على نفس محصلة F_r اثناء الحمل يجب تعويض رد فعل المنتج الذي تمثله F_{ar} المتأخرة طورياً عن F_r بازاحة F_f في اتجاه الدوران لتتقدم عن F_r، ولذلك سيتعرض الدوار لعزم كهرومغناطيسي لتدويره في الاتجاه المعاكس لمنع ازاحة محور F_f. وعليه يجب بذل عزم ميكانيكي مضاد بواسطة محرك اولي لتدوير الدوار. ويمكن التعبير عن متجهات ق.د.م المختلفة كما يلي:



شكل (9) ق.د.م المولد التزامني ومخططاتها الطورية.

$$\mathcal{F}_r = F_{mr} \cos(\omega t+\theta) \qquad (7.18)$$

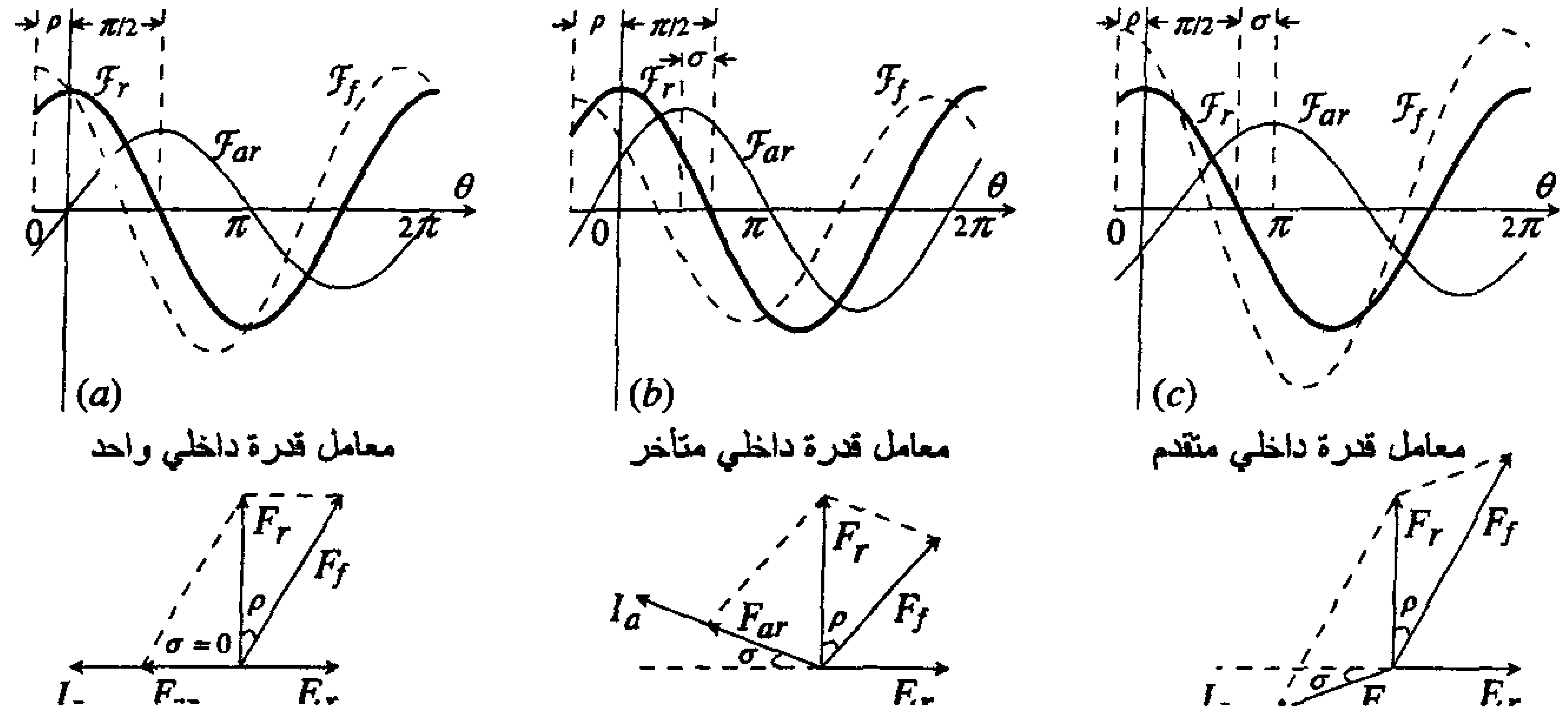
$$\mathcal{F}_f = F_{mf} \cos(\omega t+\theta+\rho) \qquad (7.19)$$

$$\mathcal{F}_{ar} = F_{ma} \cos(\omega t+\theta - \pi/2 \pm \sigma) \qquad (7.20)$$

حيث σ معامل القدرة الداخلي بين تيار (ومن ثم ق.د.م) المنتج وق.د.ك المنتج Er و ρ الزاوية الطورية بين Ff و Fr وستكون اشارة $\pm$ في المعادلة (7.20) سالبة لمعامل قدرة متأخر وموجبة لمعامل قدرة متقدم. وقد تم رسم المخططات الطورية المبينة في الشكل (9) استناداً لمحور Er حيث $\theta = 90^o$ لكون Fr تتقدم Er بهذه الزاوية.

وبينما يبين الشكل ($9a$) متجهات ق.د.م لتيار منتج منطبق طورياً على ق.د.ك المنتج (ρ=0 و م.ق واحد)، فإن الشكل ($9b$) يبين هذه المتجهات لنفس متجه ق.د.ك ولكن لتيار متأخر طورياً عن ق.د.ك (ρ<0). وبمقارنة الشكلين يتبين ان ازاحة تيار المنتج في حالة معامل القدرة المتأخر في عكس اتجاه الدوران يجعل ق.د.م المنتج تضاد ق.د.م المجال وهو ما يتطلب زيادة الاخيرة للحفاظ على نفس محصلة ق.د.م وق.د.ك. وفي المقابل يبين الشكل ($9c$) متجهات ق.د.م لنفس متجه ق.د.ك ولكن لتيار متقدم طورياً عن ق.د.ك (ρ>0) حيث تؤدي ازاحة تيار المنتج في اتجاه الدوران الى جعل ق.د.م المنتج تدعم ق.د.م المجال وهو ما يتطلب خفض الاخيرة للحفاظ على نفس محصلة ق.د.م وق.د.ك.

وعند تشغيل الآلة التزامنية كمحرك يسحب تيار بمعاملات قدرة مختلفة سيتدفق تيار المنتج فعلياً في عكس اتجاه ق.د.ك المنتج. ويمكن رسم مخططات وموجات ق.د.م المحرك بطريقة مشابهة لما تم في حالة المولد ولكن مع مراعاة قلب اتجاه التيار مقارنة باتجاهه في حالة المولد وكما هو مبين في الشكل (10). وعند اللاحمل يسحب المحرك لتغذية المفقودات تيار ذو قيمة مهملة بحيث يمكن اعتبار ق.د.م المنتج صفراً ومحصلة ق.د.م الآلة تضم ق.د.م المجال فقط Fr=Ff.



شكل (10) ق.د.م المحرك التزامني ومخططاتها الطورية.

وعند تحميله يسحب المحرك وفقاً لظروف تشغيله تيار حمولة بمعاملات قدرة محدد حيث يكون اتجاه ق.د.م منتج المحرك عكس اتجاه ق.د.م المولد المناظر لنفس معامل القدرة. وللحفاظ على محصلة F_r كما كانت اثناء اللاحمل يجب تعويض هبوط ق.د.م الذي تمثله F_{ar} المتقدمة طورياً عن F_r بازاحة F_f في عكس اتجاه الدوران لتتأخر عن F_r، ولذلك سيتعرض الدوار لعزم كهرومغناطيسي لتدويره في اتجاه الدوران لمنع ازاحة محور F_f. وعليه سيتم بدل عزم ميكانيكي لتدوير الحمولة الميكانيكية في اتجاه الدوران لموازنة عزم هذه الحمولة. ويمكن التعبير عن متجهات ق.د.م المختلفة كما يلي:

$$\mathcal{F}_r = F_{mr} \cos(\omega t+\theta) \qquad (7.21)$$

$$\mathcal{F}_f = F_{mf} \cos(\omega t+\theta - \rho) \qquad (7.22)$$

$$\mathcal{F}_{ar} = F_{ma} \cos(\omega t+\theta + \pi/2 \pm \sigma) \qquad (7.23)$$

وهنا كذلك تمثل σ معامل القدرة الداخلي بين تيار (ق.د.م) المنتج وق.د.ك المنتج E_r و ρ الزاوية الطورية بين F_f و F_r. وكما في المولد تكون اشارة $\pm$ في المعادلة (.237) سالبة لمعامل قدرة متأخر وموجبة لمعامل قدرة متقدم، وستكون ρ=0 لمعامل قدرة واحد حيث متجهات تيار و ق.د.م المنتج

منطبق طورياً على ق.د.ك المنتج (ρ=0) كما في الشكل ($10a$). وقد تم رسم المخططات الطورية المبينة في الشكل (10) استناداً لمحور E_r حيث θ = 90° لكون F_r تتقدم E_r بهذه الزاوية. ولنفس متجه ق.د.ك يبين الشكل ($10b$) متجهات ومخططات ق.د.م المحرك عند سحبه لتيار متأخر طورياً عن ق.د.ك (ρ<0). وفي المقابل يبين الشكل ($9c$) متجهات ومخططات ق.د.م المحرك عند سحبه لتيار متقدم طورياً عن ق.د.ك (ρ>0).

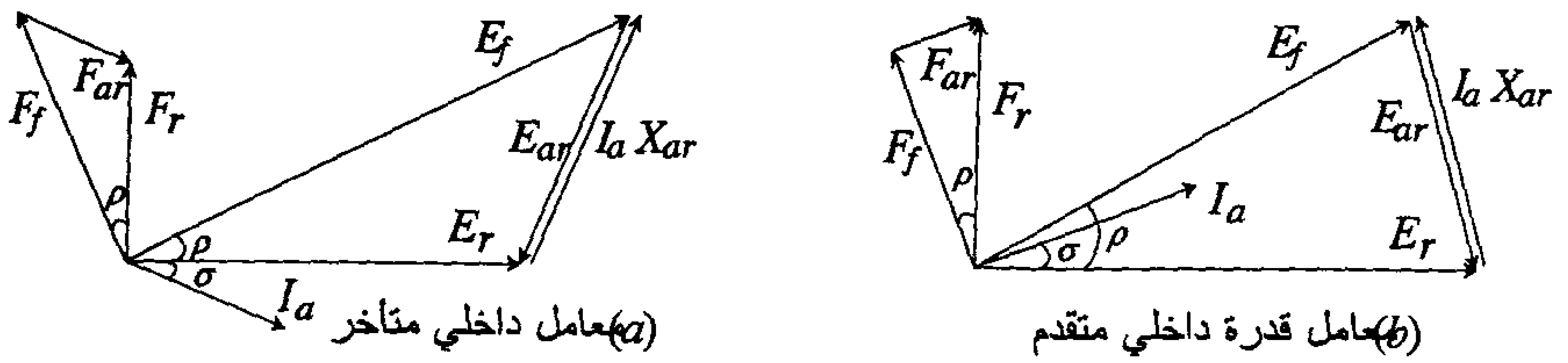
وعند تغذية المحرك التزامني من مصدر ذو تردد ثابت وجهد ثابت كما هو الحال في العادة لن يؤثر تغيير ق.د.م المجال في ق.د.ك المنتج. ونتيجة لذلك يؤدي تغيير مستوى الاثارة بتغيير تيار المجال الى تغيير معامل قدرة التيار الذي يسحبه المحرك. ويتضح من الشكل (10) ان معامل قدرة تيار المحرك يصبح متقدماً عند رفع مستوى الاثارة فوق مستوى حالة معامل القدرة واحد، وبالمثل يصبح معامل القدرة متأخراً عند خفض مستوى الاثارة دون مستوى حالة معامل القدرة واحد. ويجدر بالذكر انه بينما يسحب المحرك قدرة فعالة P (KW) في جميع حالات تحميله واثارته، فإنه اتجاه القدرة المتفاعلة Q (KVAR) عند اطراف المحرك يتوقف اساساً على طبيعة معامل قدرة التيار وكونه تأخراً ام متقدماً، ولا علاقة له باتجاه القدرة الفعالة.

7.7 الدائرة المكافئة والمخطط الطوري للآلة التزامنية.

عادةً ما يتم اهمال الممانعة المغناطيسية لمسارات الفيض خلال حديد العضوين الساكن والدوار للآلة بسبب النفاذية الكبيرة جداً لحديد الآلة مقارنة بالهواء وهو ما يجعل الممانعة المغناطيسية لحديد الآلة صغيرة جداً مقارنة بممانعة الثغرة الهوائية. وبذلك تقتصر ممانعة مسارات الفيض خلال الآلة على ممانعة الثغرة فقط. واذا كانت الثغرة الهوائية منتظمة كما هو الحال في الآلة التزامنية ذات الدوار الاسطواني، ستكون الممانعة المغناطيسية لمسار الفيض ثابتة حول محيط الثغرة الهوائية. وفي هذه الحالة ستكون الآلة

ذات خصائص وعلاقات مغناطيسية خطية بغض النظر عن موضع لفائف الدوار بالنسبة للساكن، وستنشئ ق.د.م المجال Ff وق.د.م رد فعل المنتج Far ومحصلتهما Fr الجيبية الراحلة كثافات فيض جيبية مستقلة. وستكون القيمة العظمى لكل كثافة فيض منطبقة على محور ق.د.م الناشئة لها وتدور معها بسرعة التزامن في الحالة الثابتة.

وستؤدي الحركة النسبية بين مركبات كثافة الفيض في الثغرة الهوائية ولفائف اطوار الساكن الى احتثات مركبات ق.د.ك مناظرة لكل ق.د.م في لفائف الطور حيث ينتج عن ق.د.م المجال Ff مركبة ق.د.ك Ef، وعن مركبة ق.د.م رد فعل المنتج Far ق.د.ك Ear، وعن المحصلة Fr ق.د.ك Er. ونظراً لخطية الخصائص المغناطيسية للآلة يمكن تطبيق نظرية التجميع لايجاد المحصلة Er لمركبات ق.د.ك Ef و Ear حيث تكون الازاحات او زوايا الطور النسبية لكل من Ef و Ear و Er مساوية للازاحات بين Ff و Far و Fr. وبملاحظة ان ق.د.ك تتأخر 90^o عن ق.د.م المنتجة لها يمكن رسم المخطط الطوري والتعبير عن ق.د.ك المولد كما في الشكل (11).



شكل (11) المخطط الطوري لمتجهات ق.د.ك المولد التزامني.

$$\overline{E}_r = \overline{E}_f + \overline{E}_{ar} \qquad (7.24)$$

وعند تغذية لفائف المجال من مصدر اثارة مستقل ثابت الجهد ستكون Ef الناتجة عن ق.د.م المجال Ff ثابتة وعندها سيؤدي تغيير اي من تيار المنتج او معامل قدرته الى تغيير ق.د.ك Er وكما يتضح من فحص المخططات الطورية في الشكل (11). ويفضل في الدائرة المكافئة للآلة

التعامل مع مصدر جهد ثابت حيث عادةً ما ينظر الى Ef كمصدر جهد ثابت لكونها لا تتغير مع الحمل وتمثل جهد اللاحمل او الدائرة المفتوحة (حيث E_{ar}=0) وهي تسمى اختصاراً ق.د.ك المجال او الدائرة المفتوحة. ويتم التعامل مع ق.د.ك رد فعل المنتج E_{ar} الناتجة عن ق.د.م رد فعل المنتج F_{ar} ليس كاحدى مركبتي ق.د.ك الآلة ولكن كهبوط جهد داخلي يمثله معكوسها الطوري ويتم طرحه من Ef للحصول على Er من المعادلة (7.24).

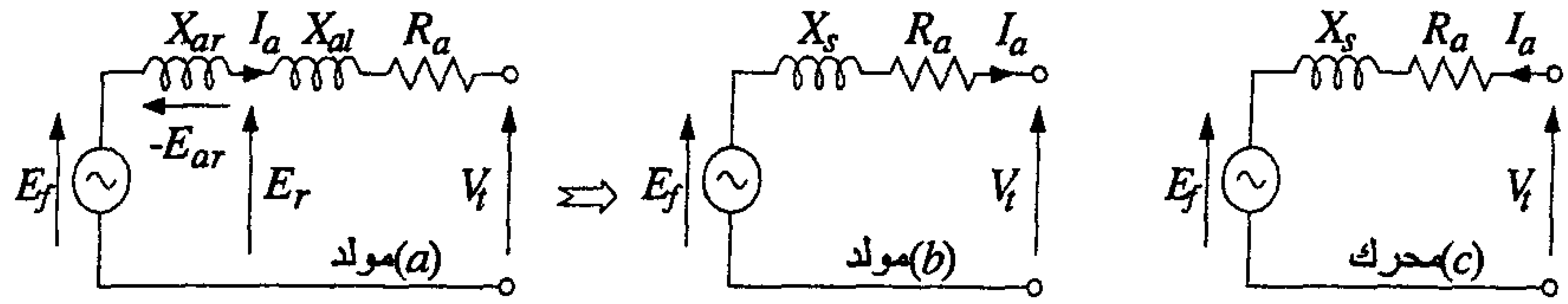
وبتفحص الشكل (11) يتضح ان E_{ar} تتأخر بشكل دائم 90^{o} عن تيار المنتج I_a بغض النظر عن زاوية معامل قدرة التيار، وبذلك سيكون معكوس E_{ar} الطوري اي E_{ar}- دائماً متقدماً غن تيار المنتج I_a بزاوية مقدارها 90^{o}لجميع حالات التشغيل. ووفقاً للافتراضات المتبعة فإن قيمة E_{ar} العظمى تتناسب خطياً مع قيمة I_a العظمى. ولكون كل منهما يمثل موجة جيبية، ستكون القيمة الفعالة للجهد E_{ar} تتناسب خطياً مع القيمة الفعالة للتيار I_a. وبذلك يتناسب هبوط الجهد E_{ar}- طردياً مع I_a ولكنه يتقدم عنه 90^{o} كما هو الحال في اي هبوط جهد حثي. ولذلك يتم تمثيل هبوط الجهد هبوط الجهد E_{ar}- بهبوط جهد حثي في مفاعلة حثية X_{ar} تسمى مفاعلة رد فعل المنتج وكما هو مبين في الشكل (11) حيث:

$$-\overline{E}_{ar} = \overline{I}_a X_{ar} \qquad (7.25)$$

$$\overline{E}_f = \overline{E}_r + \overline{I}_a X_{ar} \qquad \overline{E}_r = \overline{E}_f - \overline{I}_a X_{ar} \quad \Rightarrow \qquad (7.26)$$

ولقد تم الوصول الى المخططات الطورية المبينة في الشكل (11) ومعادلة الجهد المعبرة عنها المعادلة (7.26) استناداً لمركبات ق.د.م الثغرة الهوائية فقط مع اهما باقي معاملات دائرة منتج الآلة. ويجب في الدائرة المكافئة للآلة ان تأخذ في الحسبان مقاومة لفائف المنتج R_a ومفاعلة التسرب X_l والتي تمثل الفيض المتسرب من هذه اللفائف والذي يشبك لفائف

المنتج فقط دون ان يعبر الثغرة الهوائية وكما هو معروف في جميع الآلات الكهربائية. ويبين الشكل (12) الدائرة المكافئة للآلة التزامنية ذات الدوار الاسطواني عند تشغيلها كمولد وكمحرك.



شكل (12) الدائرة المكافئة للآلة التزامنية.

ويجدر بالملاحظة ان المقاومة R_a تمثل المقاومة الفعالة للفائف المنتج للتيار المتردد وهي اكبر من مقاومة هذه اللفائف للتيار المستمر. وتعرف المفاعلة الناتجة عن جمع مفاعلة رد فعل المنتج X_{ar} ومفاعلة التسرب X_{al} بالمفاعلة التزامنية للآلة X_s والتي تمثل مع المقاومة R_a المعاوقة التزامنية Z_s. ويمكن من الشكلين $(12b)$ و $(11c)$ التعبير عن المفاعلة والمعاوقة التزامنية وعن معادلة الجهد لحالتي المولد والمحرك التزامني كما يلي:

$$X_s = X_{ar} + X_{al} \qquad (7.27)$$

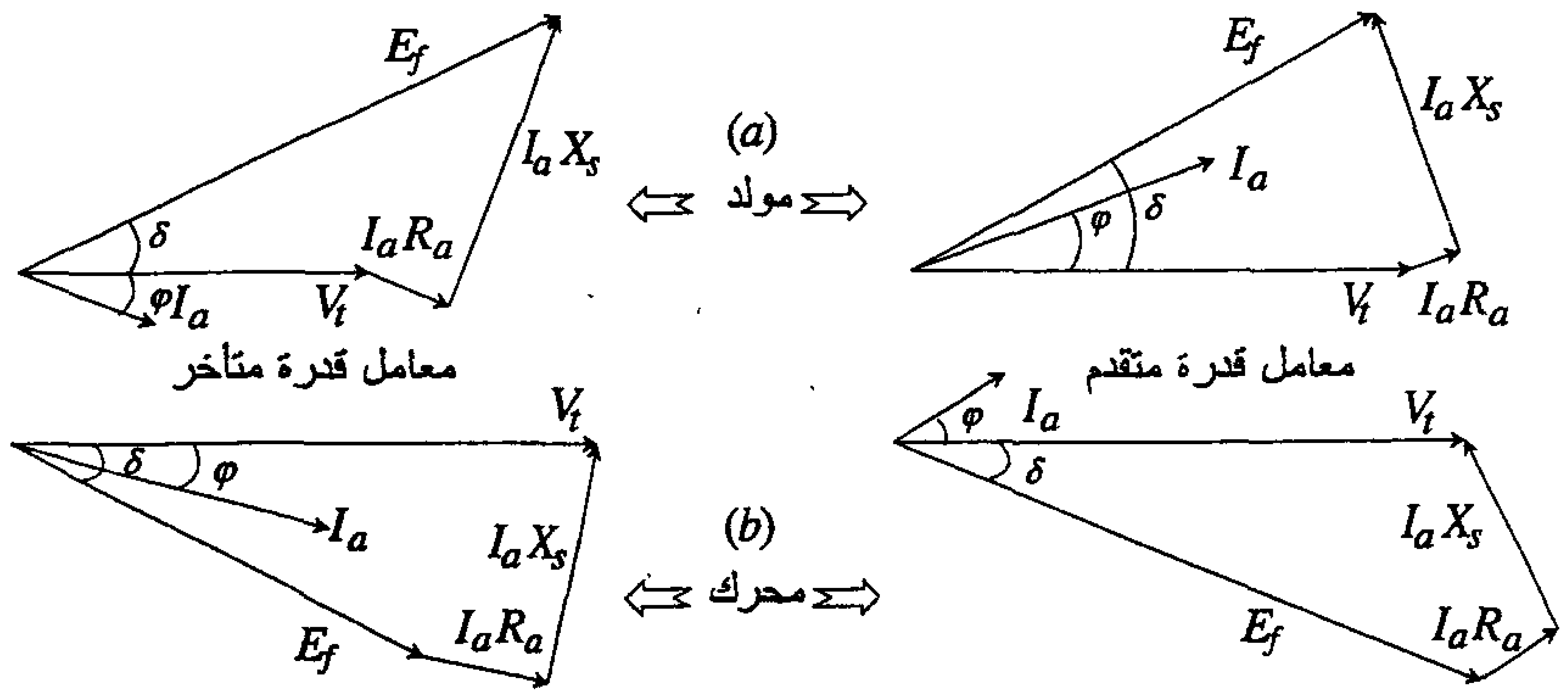
$$Z_s = R_a + jX_s \qquad (7.28)$$

$$E_f \angle\delta = V_t \angle 0 + I_a (R_a + jX_s) \text{ (للمولد)} \qquad (7.29)$$

$$E_f \angle\delta = V_t \angle 0 - I_a (R_a + jX_s) \text{ (للمحرك)} \qquad (7.30)$$

ويبين الشكل (13) المخططات الطورية للآلة التزامنية كما يمكن رسمها من الدوائر المكافئة المبينة في الشكل $(12b)$ و $(12c)$للمولد والمحرك التزامني. وبالمقارنة بالشكل (10) يلاحظ ان اتجاه تيار المحرك قد تم قلبه في الشكل (13) لتبسيط تمثيل المحرك مع قلب الاتجاه الاصطلاحي للتيار في الدائرة المكافئة ليكون موجباً وهو يدخل الطرف الموجب (اي عكس المولد). ومن المهم ملاحظة ان الزاوية δ بين Ef و V_t والتي تعرف

بزاوية القدرة او العزم تكون دائماً موجبة للمولد وسالبة للمحرك بغض النظر عن معامل قدرة التيار، وهي تلعباً دوراً مهماً في انتقال القدرة من الآلة واستقرارية الآلة.



شكل (13) المخطط الطوري للآلة التزامنية.

ونظراً لوجود لفائف مجال تغذى بتيار اثارة مستمر مستقل يمكن التحكم في ق.د.ك الآلة وبشكل مستقل عن تيار لفائف المنتج. ووفقاً لمستوى تيار الاثارة يمكن للتيار الذي يسحبه منتج المحرك التزامني من المصدر ان يكون متأخراً او متقدماً طورياً عن جهد المنتج بحسب مقدار ق.د.ك المنتج مقارنة بجهد المصدر. وعليه يمكن للمحرك التزامني ان يسحب تيار متأخر طورياً (بمعامل قدرة متأخر) عند الاثارة الناقصة ليعمل كملف يستهلك قدرة متفاعلة KVAR، او ان يسحب تيار متقدم طورياً (بمعامل قدرة متقدم) عند الاثارة المفرطة ليعمل كمكثف ينتج قدرة متفاعلة، او ان يسحب تيار منطبقاً طورياً على الجهد (بمعامل قدرة الواحد) عند الاثارة المستوية ولن يستهلك او ينتج اي قدرة متفاعلة.

وبذلك يمكن بتغيير تيار لفائف المجال التحكم في معامل قدرة التيار الذي يسحبه المحرك التزامني من المصدر. واذا تم توصيل المحرك التزامني بمنظومة قوى كهربائية وترك عائماً بلا حمل، فهو سيعمل اما كمحاثة او متسعة متغيرة مع تغير تيار الاثارة. وفي هذه الحالة لا يصح وصف

الآلة بدقة كمولد لكونه لا يزود منظومة القوى بقدرة فعالة ولا كمحرك لكونه لا يدير اي حمل. وتدعى الآلة التزامنية التي تستخدم بهذه الكيفية بالمكثف التزامني (synchronous condenser). ويستخدم المكثف التزامني لتنظيم جهد القضبان في منظومات النقل، او لتحسين معامل القدرة في المنشآت الصناعية التي تضم عدد كبير من المحركات والاحمال الحثية التي عادةً ما تسحب قدرة متفاعلة كبيرة تتسبب في هبوط جهد كبير.

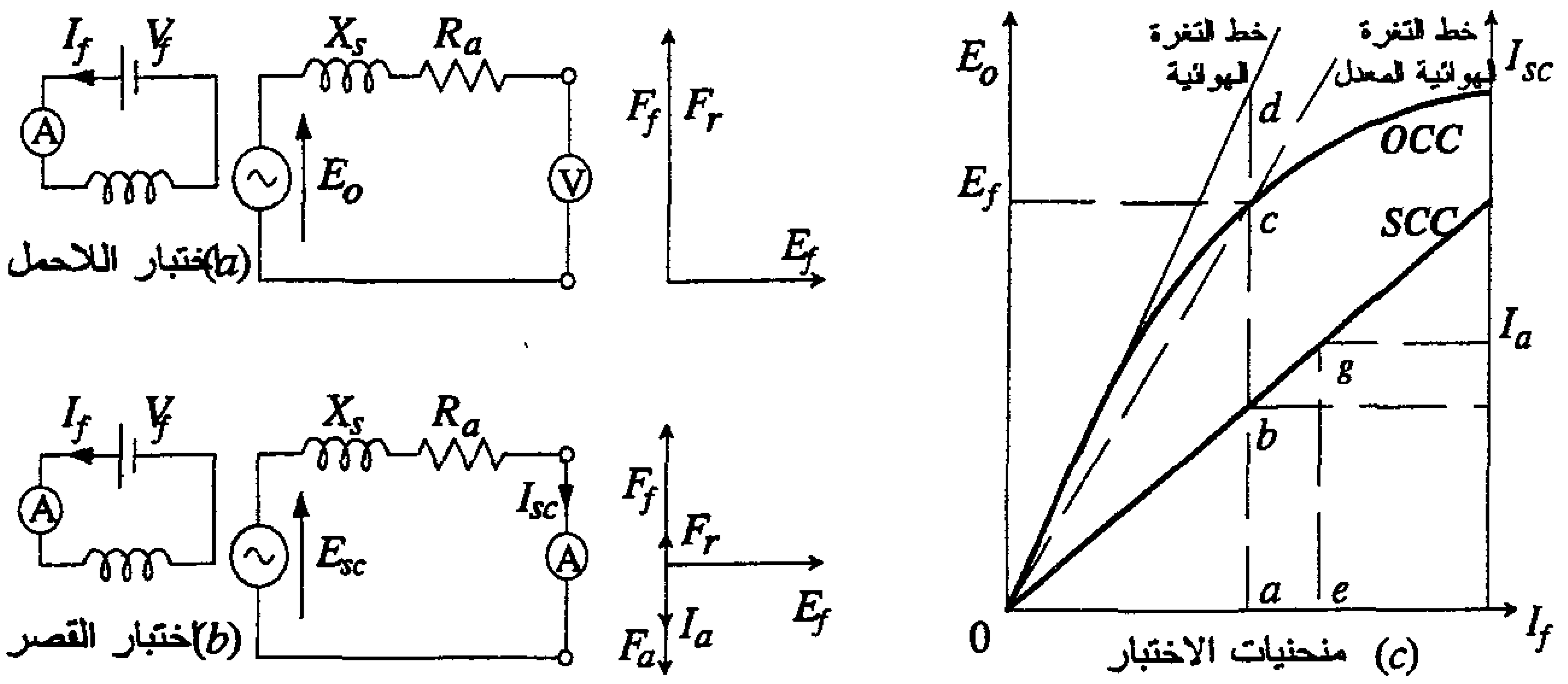
8.7 تعيين معاملات الدائرة المكافئة.

تهدف اختبارات الآلة التزامنية الى الحصول على منحنيات اداء الآلة في الظروف المختلفة وايجاد معاملات دائرتها المكافئة. وبينما يمكن قياس بعض معاملات الدائرة المكافئة للآلة مباشرة بالقياس البسيط عند اطراف الآلة، فإنه لا يمكن تعيين البعض الآخر بدقة بشكل مباشر. وفي ابسط الاختبارات يتم قياس مقاومة لفائف المنتج باستخدام مصدر تيار مستمر عند درجة حرارة مناسبة ومن ثم تصحيحها للاخذ في الاعتبار بارتفاع درجة حرارة التشغيل وتأثير ظاهرة القشرة الناتجة عن تدفق التيار المتردد في لفائف المنتج. ويجدر بالملاحظة ان المقاومة الفعالة للمنتج R_a تزيد عن مقاومة لفائفه للتيار المستمر بنسبة 20٪ الى 60٪. وفي المقابل يتطلب تعيين المفاعلة التزامنية للآلة اجراء اختبارات الدائرة المفتوحة والدائرة المقصورة كما يلي:

اختبار الدائرة المفتوحة.

يجرى اختبار الدائرة المفتوحة للآلة التزامنية بفتح اطراف المنتج وتدوير الآلة كمولد بسرعة التزامن وقياس جهد الاطراف E_o مع رفع تيار المجال I_f من الصفر الى القيمة المقننة كما في الشكل $(14a)$. وكما في المعادلة (7.16) تعتمد ق.د.ك اللاحمل على الفيض الذي يعتمد في هذه الحالة على ق.د.م وتيار المجال فقط. وبرسم العلاقة بين جهد اللاحمل الذي يمثل ق.د.ك E_f وتيار الاثارة I_f يتم الحصول على منحنى خاصية الدائرة المفتوحة

OCC الـذي يشـبه منحنـى المغنطـة وكمـا ـِفي الشـكل ($14c$). وبرفـع تيـار المجال If من الصفر لن ترتفع E_O معه خطياً نتيجة لتأثير التشبع المغناطيسي. ويعرف الخط المنطبق على الجزء الخطي لمنحنى OCC بخـط الثغـرة الهوائيـة الذي يمثل مسار المنحنى عند اهمال ممانعة الحديد واعتبار ممانعة الثغرة فقط. ويتضح ان Ef ستزداد على طول هذا الخط عند عدم وجود ظاهرة التشبع المغناطيسي المرتبطة بمغنطة الحديد.



شكل (14) اختبارات الدائرة المفتوحة والدائرة المقصورة للآلة التزامنية.

وتمثل القدرة الميكانيكية المطلوبة لتدوير الآلة التزامنية اثناء اختبار الـدائرة المفتوحـة الفقـودات الدورانيـة اثنـاء اللاحمـل والـتي تضـم الفقـودات الميكانيكية التي تضل ثابتة لثبوت السرعة التزامنية المتمثلة وتشمل فقد الاحتكاك وفقد اضطراب الهواء، وفقودات الحديد او القالب التي تتناسب مع جهد الاطراف وتشمل فقد التيارات الدوامية والتخلف المغناطيسي. وعند فتح دائرة المجال ستشمل القدرة الميكانيكية المطلوبة لتدوير الآلة اثناء اللاحمل الفقودات الميكانيكية فقط، وبذلك يمكن الحصول على فقد القالب من الفارق بين القدرة الميكانيكية لحالة اللاحمل عند تدفق تيار المجال وعند فتح دائرة المجال.

اختبار الدائرة المقصورة.

يجرى اختبار الدائرة المقصورة بقصر اطراف المنتج (وفتح ـائرة المجال) وتدوير الآلة كمولد بسرعة التزامن وقياس متوسط تيار المنتج مع رفع تيار المجال تدريجياً من الصفر الى ان يصل تيار المنتج القيمة المقننة وكما في الشكل $(14b)$. وبرسم العلاقة بين تيار المنتج المقصور I_{SC} وتيار الاثارة I_f واستكمال خط العلاقة الى الخارج يتم الحصول على خاصية الدائرة المقصورة كما يمثلها خط SCC في الشكل $(14c)$. وتكون SCC خطاً مستقيماً لأنه في حالة القصر لن يصل تيار المجال ومستوى فيض الثغرة الهوائية مرحلة التشبع المغناطيسي قبل ان يصل تيار المنتج المقصورة قيمته المقننة.

ولأنه غالباً ما تكون $R_a \ll X_S$ سيكون تيار المنتج المقصور I_a متأخراً عن E_f بقرابة 90^o وتكون F_{ar} في عكس اتجاه F_f. وبذلك ستكون F_r ومن ثم تكون E_r صغيرة جداً حتى لقيم I_f و I_a الكبيرة وكما هو مبين في الشكل $(14b)$. ولن تتجاوز E_r في هذه الحالة 20٪ من الجهد المقنن وهو ما يؤكد عدم حدوث التشبع في حالة الدائرة المقصورة. وعند عدم حدوث التشبع ستزداد F_f خطياً مع I_f على طول خط الثغرة الهوائية ومن تم سيزداد تيار المنتج I_a خطياً مع تيار الاثارة.

ويمكن ايجاد الفقودات الناتجة عن تدفق تيار المنتج بمعرفة القدرة الميكانيكية التي تدير الآلة التزامنية اثناء اختبار الدائرة المقصورة والتي تشمل الفقودات الدورانية الميكانيكية اضافةً الى الفقودات الناتجة عن تدفق تيار المنتج. ومن تم يمكن حساب الفقودات التي تعود الى تدفق تيار المنتج بطرح الفقودات الدورانية الميكانيكية (التي يتم ايجادها من اختبار الدائرة المفتوحة) من القدرة الميكانيكية التي تدير الآلة اثناء اختبار الدائرة المقصورة. وتشمل الفقودات الناتجة عن تدفق تيار المنتج الفقد في مقاومة

المنتج والفقودات المغناطيسية في اللب. وبقياس مقاومة المنتج للتيار المستمر وتصويبها للتيار المتردد ودرجة حرارة التشغيل يمكن حساب الفقد في مقاومة المنتج ومن ثم طرحها من الفقودات الناتجة عن تيار المنتج اثناء اختبار الدائرة المقصورة للحصول على الفقودات المغناطيسية التي تشمل فقودات التخلف المغناطيسي وفقودات التيارات الدوامية.

تعيين المفاعلة التزامنية.

يلعب التشبع المغناطيسي دور اساسي في اداء المولد حيث تزداد درجته مع ابتعاد منحنى خاصية الفتح عن خط الثغرة الهوائية كما في الشكل ($14c$) الذي يبين منحنى خاصية الدائرة المفتوحة OCC بين ق.د.ك المنتج وتيار المجال عند فتح الاطراف، وخط خاصية الدائرة المقصورة SCC بين تيار المنتج وتيار المجال عند قصرها. وعند اهمال التشبع المغناطيسي في الحديد الآلة سيمثل خط الثغرة الهوائية منحنى OCC ويمكن الحصول على المعاوقة التزامنية للآلة غير المتشبعة Z_{SU} التي تضم مقاومة المنتج R_a والمفاعلة التزامنية غير المتشبعة X_{SU} كما يلي:

$$Z_{SU} = \sqrt{R_a^2+X_{su}^2} = \frac{E_{da}}{I_{ba}} \qquad (7.31)$$

$$X_{SU} = \sqrt{Z_{su}^2 - R_a^2} \qquad (7.32)$$

ولأنه غالباً ما تكون $X_{SU} \gg R_a$ يمكن اهمال R_a والحصول تقريبياً على المفاعلة التزامنية غير المتشبعة X_{SU} كما يلي:

$$X_{SU} \approx \frac{E_{da}}{I_{ba}} \qquad (7.33)$$

وعند اخذ التشبع المغناطيسي في الحسبان سيمثل منحنى OCC العلاقة بين ق.د.ك اللاحمل وتيار المجال يمكن الحصول على المعاوقة التزامنية للآلة المتشبعة Z_{SS} التي تضم مقاومة المنتج R_a والمفاعلة التزامنية

المتشبعة X_{SS} من ق.د.ك اللاحمل للآلة المتشبعة وتيار القصر المناظر في الشكل ($14c$). وبمراعاة ان $X_{SS} \gg R_a$ يمكن الحصول على X_{SS} بالدقة والتقريب كما يلي:

$$Z_{SS} = \sqrt{R_a^2 + X_{ss}^2} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} \qquad (7.34)$$

$$X_{SS} = \sqrt{Z_{ss}^2 - R_a^2} \qquad (7.35)$$

$$X_{SS} \approx \frac{E_{ca}}{I_{ba}} \qquad (7.36)$$

واذا تم تثبيت الفيض عند مستوى الجهد المقنن عند اللاحمل Ef سيمثل منحنى OCC خط الثغرة الهوائية المعدل وكما هو مبين في الشكل ($14c$). وعندها سيؤدي تغير تيار المجال الى تغيير ق.د.ك اللاحمل على طول هذا الخط وليس المنحنى الاصلي. وعند استخدام نظام النسبة الواحدية للتعبير عن معاملات الآلة تعطى معاوقة الاساس للآلة $Zbase$ بقسمة الجهد المقنن (ق.د.ك اللاحمل) على التيار المقنن ويمكن من الشكل ($14c$) التعبير عن المفاعلة التزامنية المتشبعة بالقيمة الواحدية كما يلي:

$$Z_{base} = \frac{E_f}{I_a} = \frac{E_{ca}}{I_{ge}} \qquad (7.37)$$

$$X_{SS(pu)} = \frac{X_{ss}}{Z_{base}} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} \Big/ \frac{E_{ca}}{I_{ge}}$$

$$X_{SS(pu)} = \frac{I_{ge}}{I_{ba}} = \frac{I_{foe}}{I_{foa}} \qquad (7.38)$$

ويعرف معكوس $X_{SS(pu)}$ بنسبة القصر (SCR) التي تعكس مستوى التشبع وهي تمثل نسبة تيار المجال الذي يعطي ق.د.ك المقننة على منحنى OCC الى تيار المجال الذي يعطي التيار المقنن على خط SCC في الشكل ($14c$) حيث:

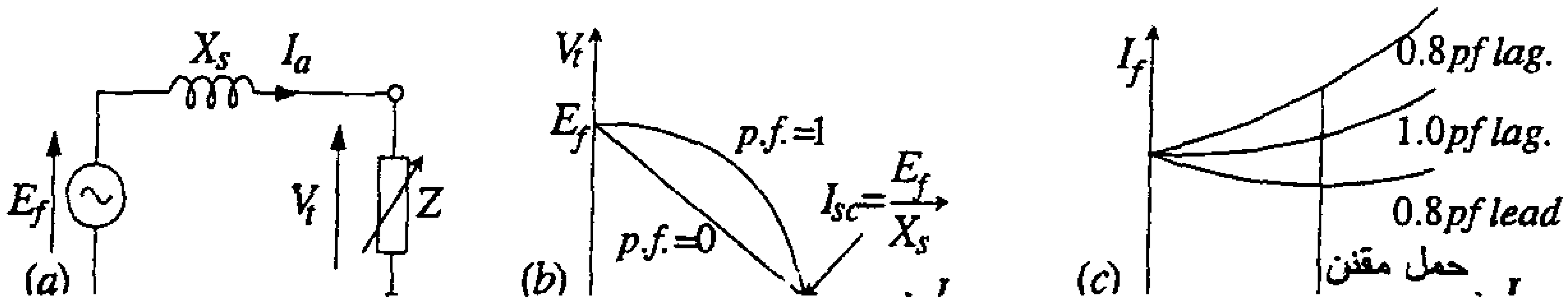
$$SCR = \frac{I_{foa}}{I_{foe}} = \frac{1}{X_{ss(pu)}} \qquad (7.39)$$

9.7 تنظيم جهد المولد التزامني.

يتم في بعض الحالات استخدام مولدات تزامنية لتغذية احمال مستقلة مثل المولدات الاحتياطية في المنشآت المهمة حيث يدار المولد بسرعة ثابتة بمحرك ديزل للحصول على تردد ثابت. ويتعرض المولد الى تغير جهد اطرافه مع تغير الحمل بسبب هبوط الجهد في معاوقته. وعادةً ما يلحق بالمولد منظم جهد ذاتي لضبط تيار المجال ومن ثم ق.د.ك المولد ذاتياً لتثبيت الجهد. وتعرف نسبة تغير الجهد مع الحمل بتنظيم الجهد $\mathcal{R}$ الذي يمثل الارتفاع النسبي في جهد اطراف المولد عند اخراج الحمولة حيث يكون المولد مستقلاً عن اية مولدات اخرى ويعمل بسرعة تزامنيه ثابتة وتيار اثارة ثابت قبل وبعد اخراج الحمولة. ويمثل ارتفاع الجهد الفارق بين مقادير ق.د.ك اللاحمل Ef وجهد اطراف المنتج V_t عند الحمل المحدد كنسبة الى الاخير حيث:

$$\mathcal{R} = \frac{E_f - V_t}{V_t} \approx \frac{I_a Z_s}{V_t} \qquad (7.40)$$

ويعتمد تنظيم الجهد على كل من مستوى الحمولة ومعامل قدرتها، وهو يمكن ان يكون صفراً (القيمة المثلى) لحمولة محددة بمعامل قدرة متقدم محدد. ويمكن ان يكون تنظيم جهد المناوب سالباً اذا تم تحميله بحمولة ذات معامل قدرة متقدم تفوق حمولة تنظيم الجهد الصفري. وغالباً ما تعمل المناوبات عند معاملات قدرة متأخرة ويكون تنظيم جهدها كبير نسبياً. ويمكن ايجاد منحنى خصائص جهد الاطراف المولد التزامني المستقل المحمّل مع تغير الحمل بالرجوع الى الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (15) مع اهمال مقاومة المنتج الصغيرة والاخذ في الاعتبار بالمفاعلة التزامنية فقط. ويمكن من منحنيات خاصية الدائرة المفتوحة OCC وخاصية الدائرة المقصورة SCC التعبير عن ق.د.ك المولد بدلالة تيار القصر كما يلي:



شكل (15) منحنيات الاداء لمحرك تزامني مستقل.

$$X_S \approx \frac{E_f}{I_{sc}} \quad \Rightarrow \quad E_f \approx I_{SC} X_S \qquad (7.41)$$

ويبين الشكل واذا تم تغيير تيار المنتج (بتغيير الحمل) من I_a=0 الى I_a=I_{SC}=E_f/X_{SC} سيتغير جهد اطراف المنتج من V_t=E_f الى V_t=0. واذا تم تثبيت تيار الاثارة ومن ثم E_f سيتغير جهد الاطراف على مدى واسع مع تغير تيار المنتج مما يعني سؤ تنظيم الجهد. وبالتعويض عن E_f من المعادلة (7.41) يمكن مس الشكل (15) التعبير عن جهد الاطراف V_t بدلالة تيار المنتج I_a لحمل حثي نقي (Z_L=X_L) كما يلي (لاحظ ان جميع مركبات الجهد حثية منطبقة طورياً ويمكن جمعها وطرحها قياسياً):

$$V_t = E_f - X_S I_a = X_S I_{SC} - X_S I_a$$

$$V_t = X_S (I_{SC} - I_a) \qquad (7.42)$$

وفي المقابل يمكن التعبير عن جهد الاطراف بدلالة تيار المنتج لحمل مقاومي نقي (Z_L=R_L) حيث V_t= $I_a R_L$ كما يلي:

$$I_a = \frac{E_f}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}} = \frac{X_s I_{sc}}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_a^2}{I_{sc}^2} = \frac{X_s^2}{R_L^2 + X_s^2} \qquad (7.43)$$

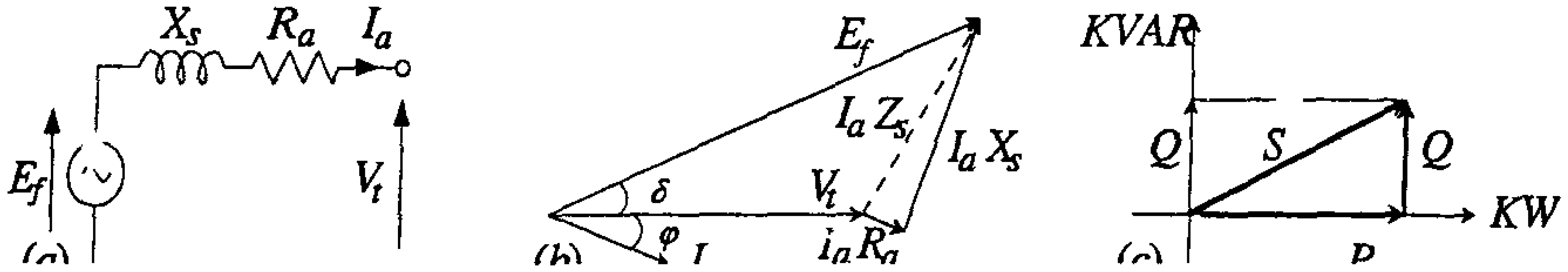
$$\Rightarrow V_t^2 = X_s^2 I_{sc}^2 \left(\frac{R_L^2}{R_L^2 + X_s^2}\right) \qquad V_t = I_a R_L = \frac{R_L X_s I_{sc}}{\sqrt{R_L^2 + X_s^2}} \qquad (7.44)$$

$$\frac{V_t^2}{X_s^2 I_{sc}^2} = \frac{R_L^2}{R_L^2 + X_s^2} = 1 - \frac{X_s^2}{R_L^2 + X_s^2} \Rightarrow \frac{V_t^2}{X_s^2 I_{sc}^2} + \frac{I_a^2}{I_{sc}^2} = 1 \quad (7.45)$$

وتبين المعادلة (42 . 7) ان جهد الاطراف يهبط خطياً مع زيادة تيار المنتج لحمولة معامل القدرة صفر، بينما تبين المعادلة (45 . 7) ان العلاقة بين جهد الاطراف وتيار المنتج لحمولة معامل القدرة تكون علي شكل ربع قطع ناقص وكما في الشكل ($15b$). ويتضح من ذلك ان جهد الاطراف سيهبط بشكل حاد مع زيادة تيار المنتج وانخفاض معامل قدرة الحمولة، متسبباً في سؤ تنظيم جهد المولد. ويتطلب الحفاظ على جهد الاطراف ثابتاً مع تغيير الحمولة تغيير ق.د.ك الاثارة Ef بتغيير تيار المجال. ويبين الشكل ($15c$) التغير في تيار المجال اللازم لتثبيت جهد الاطراف مع زيادة تيار المنتج (الحمولة).

7.10 خصائص القدرة والعزم.

وكما هو الحال في تحليلات الآلات ثلاثية الطور يفضل تحويل أي معطيات خطية (بين الخطوط) الى كميات طورية واستخدام الدائرة المكافئة للطور الواحد للتحليل واخيراً تحويل النتائج الطورية النهائية الى كميات ثلاثية الطور حيثما تطلب الامر ذلك. وفي حالة التحميل الثابتة تؤدي ق.د.ك المولد Ef الى تدفق تيار الحمل I_a في مقاومة المنتج R_a والمفاعلة التزامنية X_s ويمكن نمذجة المولد ذو الدوار الاسطواني بالدائرة المكافئة المبينة في الشكل ($16a$) والمخطط الطوري في الشكل ($16b$). ومن هذا النموذج يمكن التعبير عن مركبات القدرة لكل طور وكما يضح العلاقة بينها مثلث القدرة المبين في الشكل ($16c$) كما يلي:



شكل (16) تمثيل مولد تزامني يعمل بجهد وتردد ثابتين.

$$V_t = V_t \angle 0\ , E_f = E_f \angle \delta , I_a = I_a \angle \phi ,$$

$$Z_s = R_a + jX_s = Z_s \angle \theta , \quad S = V_t I_a^* = P + jQ$$
(7.46)

$$E_f \angle \delta = V \angle 0 + I_a \angle \phi (R_a + jX_s) = V \angle 0 + I_a \angle \phi \ Z_s \angle \theta$$
(7.47)

$$I_a \angle \phi = (E_f \angle \delta - V_t \angle 0)/(R_a + jX_s) = (E_f \angle \delta - V_t \angle 0) / Z_s \angle \theta$$
(7.48)

$$S = V_t I_a^* = V_t \angle 0 \left(\frac{E_f \angle \delta - V_t \angle 0}{Z_s \angle \theta} \right)^* = V_t \angle 0 \left(\frac{E_f \angle - \delta - V_t \angle 0}{Z_s \angle - \theta} \right)$$
(7.49)

$$P + jQ = \frac{V_t E_f}{Z_s} \angle (\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{Z_s} \angle \theta \qquad (7.50)$$

$$P = \frac{V_t E_f}{Z_s} \cos(\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{Z_s} \cos\theta \qquad (7.51)$$

$$Q = \frac{V_t E_f}{Z_s} \sin(\theta - \delta) - \frac{V_t^2}{Z_s} \sin\theta \qquad (7.52)$$

وتعرف الزاوية δ بزاوية الحمل او العزم او زاوية القدرة للمولد. وفي المولدات العملية الكبيرة عادةً ما تكون $R_a \ll X_s$ ولذلك يمكن اهمال مقاومة المنتج مما يجعل $Z_s \approx X_s$ و $\theta \approx 90^\circ$ وبالتالي يمكن تبسيط المعادلتين (7.51) و (7.52) كما يلي:

$$P = \frac{V_t E_f}{X_s} \sin \delta \tag{7.53}$$

$$P = P_{max} \sin \delta, \; P_{max} = \frac{V_t E_f}{X_s} \tag{7.54}$$

$$Q = \frac{V_t E_f}{X_s} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_s} \tag{7.55}$$

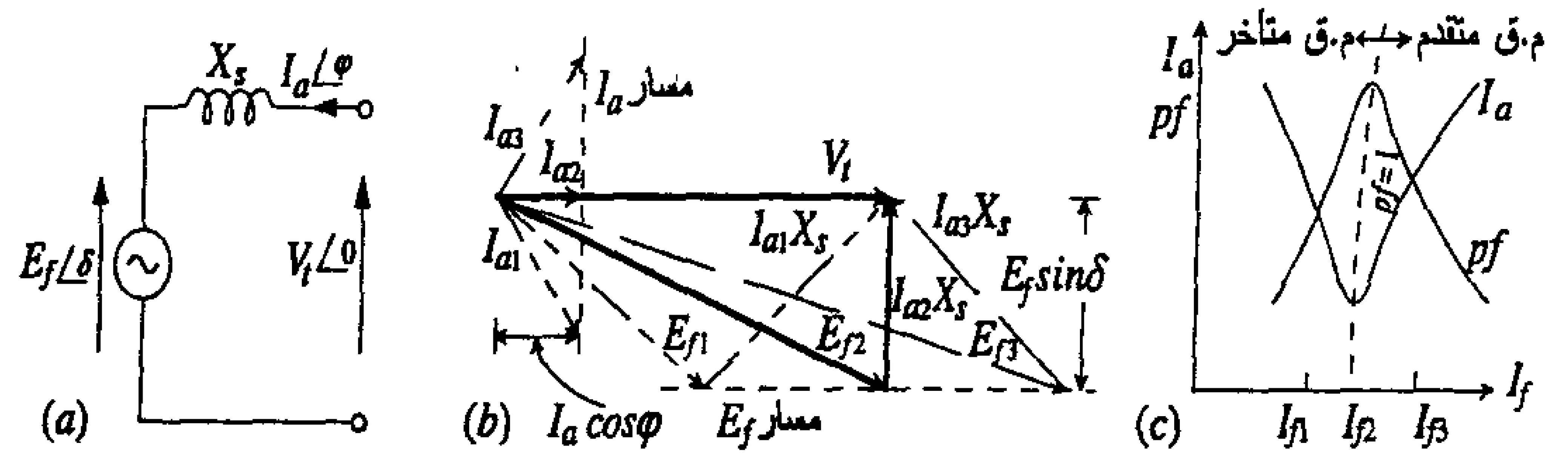
وعند ثبوت V_t و Ef تبين المعادلة (7.54) ان القدرة الفعالة P تتغير جيبياً مع δ. فعندما تكون δ موجبة (Ef تسبق V_t) تكون P موجبة وتعمل الآلة كمولد، وعندما تكون δ سالبة (Ef تلحق V_t) وتكون P سالبة وتعمل الآلة كمحرك. وتبين المعادلة (7.55) ان تدفق القدرة المتفاعلة Q يتحدد اساساً بمقدار Ef ومن تم بمستوى الاثارة وليس باتجاه او مقدار P. وستكون Q موجبة اذا كان المولد مفرط الاثارة ($Ef \cos\delta > V_t$) ليعمل حينها كمكثف ينتج قدرة متفاعلة، وتكون Q سالبة اذا كان المولد ناقص الاثارة ($Ef \; \cos\delta \; < \; V_t$) ليعمل كملف يستهلك قدرة متفاعلة، وستكون Q=0 للمولد مستوي الاثارة ($Ef \cos\delta = V_t$). وباهمال مقاومة المنتج وفقودات الدوار ستكون القدرة الكهربائية عند اطراف المنتج P مساوية للقدرة القادمة من الثغرة الهوائية P_e والتي يقابلها العزم الكهربائي T_e المبذول في الآلة والذي يمكن التعبير عنه بقسمة القدرة على السرعة الزاوية وكما يلي:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_s} = \frac{V_t E_f}{\omega_s X_s} \sin \delta = T_{max} \sin \delta, \; T_{max} = \frac{V_t E_f}{\omega_s X_s} = \frac{P_{max}}{\omega_s} \tag{7.56}$$

11.7 خصائص معامل القدرة.

من اهم ما يميز الآلة التزامنية مقارنةً بالآلات الاخرى امكانية التحكم في معامل قدرة تيار منتجها عن طريق تغيير تيار الاثارة حيث يمكن

ضبط تيار المجال لجعل تيار المنتج متأخراً او متقدماً حسب الطلب. ويمكن توضيح خصائص معامل القدرة من خلال المخططات الطورية للآلة لجهود وتيارات الآلة. وعند ثبوت جهد وتردد المصدر للمحرك التزامني كما هو الحال في العادة سيدور المحرك بسرعة تزامنية ثابتة ويمكن من خلال الدائرة المكافئة للمحرك التزامني المبينة في الشكل (17)، ومع اهمال المقاومة التعبير عن القدرة التي يزود بها المصدر المحرك كما يلي:



شكل (17) خصائص المحرك التزامني لقدرة ثابتة.

$$P = V_t I_a \cos\phi = \frac{V_t E_f}{X_s}\sin\delta \qquad (7.57)$$

ويجدر بالذكر ان القدرة الفعالة P هي التي يتم تحويلها الى قدرة ميكانيكية لادارة الحمولة الميكانيكية للمحرك وهي التي يجب تثبيتها لتحويل قدرة ميكانيكية ثابتة للحمولة بغض النظر عن قيم القدرة الظاهرية S والقدرة المتفاعلة Q التي يسحبها المحرك. ولثبوت جهد الاطراف V_t يتطلب التشغيل بقدرة فعالة ثابتة ان تكون $I_a\cos\phi$، أي مركبة تيار المنتج المنطبقة على الجهد ثابتة وكذلك $E_f\sin\delta$ أي مركبة ق.د.ك الاثارة المتعامدة على جهد الاطراف. وبذلك يكون مسار تيار المنتج I_a لحالة القدرة الثابتة خط عمودي على متجه جهد ويكون مسار ق.د.ك الاثارة E_f خط موازي لمتجه الجهد كما في الشكل $(17b)$.

ويبين الشكل $(17b)$ المخطط الطوري لتيار I_a وق.د.ك E_f لجهد اطراف وقدرة محددين تضمن ثبوت $I_a\cos\phi$ و $E_f\sin\delta$ حيث يمثل I_{a1} تياراً متأخراً ويمثل I_{a2} تياراً منطبق طورياً على الجهد (معامل قدرة واحد)

ويمثل I_{a3} تياراً متقدماً عن الجهد. وتمثل E_{f1} و E_{f2} و E_{f3} ق.د.ك الاثارة المناظرة لتيارات المنتج I_{a1} و I_{a2} و I_{a3} على الترتيب. وفي اطار خطية العلاقة بين E_f و I_f تمثل I_{f1} و I_{f2} و I_{f3} تيارات الاثارة اللازمة لانتاج ق.د.ك الاثارة E_{f1} و E_{f2} و E_{f3} على الترتيب.

ولكون ق.د.ك الاثارة E_f تتغير خطياً مع I_f سيؤدي تغيير تيار الاثارة I_f الى تغيير E_f على طول مسار E_f كما يؤدي الى تغيير تيار المنتج I_a على طول مسار I_a مما يتسبب في تغيير زاوية معامل قدرة تيار المنتج ϕ وزاوية القدرة δ وكما هو مبين في الشكل ($17b$). ولقيم تيار الاثارة I_f المنخفضة ($I_f = I_{f1}$) حيث تكون الآلة ناقصة الاثارة ($E_f = E_{f1}$) سيكون تيار المنتج ($I_a = I_{a1}$) كبيراً ومتأخراً عن الجهد. وتحدث اقل قيمة لتيار المنتج ($I_a = I_{a2}$) عند معامل قدرة واحد ولتيار اثارة وسط I_{f2} حيث تكون الآلة مستوية الاثارة ($E_f = E_{f2}$). ولقيم I_f الكبيرة ($I_f = I_{f3}$) حيث تكون الآلة مفرطة الاثارة ($E_f = E_{f3}$) سيكون تيار المنتج ($I_a = I_{a3}$) كبيراً ولكنه متقدماً عن الجهد.

ويبين الشكل ($17c$) منحنى العلاقة بين تيار المنتج وتيار المجال لحالة تشغيل المحرك بقدرة ثابتة من مصدر ذو جهد ثابت والذي تعرف بمنحنى- V نسبة الى شكل المنحنى. ويعرف منحنى العلاقة بين معامل قدرة تيار المنتج pf وتيار المجال للحالة السابقة بمنحنى- V المقلوب وكما هو مبين في الشكل ($17c$). ويمكن الحصول على عدة منحنيات- V للآلة التزامنية لمستويات حمل ثابتة مختلفة حيث يكون منحنى- V للحمولة الاكبر فوق منحنى- V للحمولة الاصغر مع تشابه شكل المنحنيين حيث يكون مركز منحنيات- V على طول مسار معامل القدرة واحد كما في الشكل ($17c$).

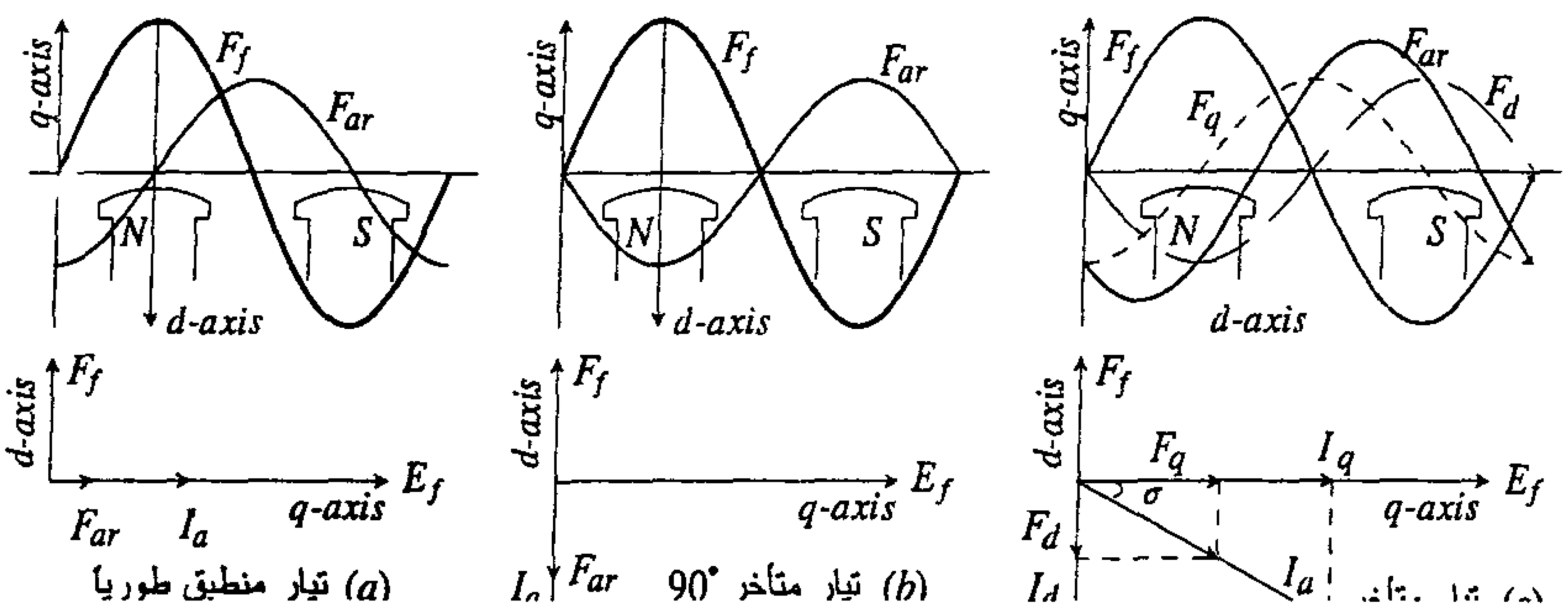
وعادةً ما يستفاد من الميزة الكبرى للآلات التزامنية والمتمثلة في التحكم في معامل قدرة تيار المنتج بواسطة تيار الاثارة في تحسين معامل القدرة في المنشآت الصناعية. وغالباً ما تكون معظم الآلات المستخدمة في هذه المنشآت محركات حثية تمثل حمولة ذات معامل قدرة متأخر وتسحب كميات هائلة من القدرة المتفاعلة من الشبكة وتتسبب في هبوط جهد كبير. وللحد من ذلك يمكن استخدام محركات تزامنية يتم تشغيلها باثارة مفرطة لتعمل بمعامل قدرة متقدم لتعويض معامل القدرة المتأخر للمحركات الحثية ومن ثم تحسين معال القدرة الاجمالي للمنشأة الصناعية. ويمكن ربط الآلة بشبكة منظومة قوى كبيرة كمحرك بدون حمل ليسحب تيار عمودي على الجهد بمعامل قدرة صفر. وفي هذه الحالة سيؤدي تغير تيار الاثارة الى تغير مقدار تيار المنتج مع بقائه حثياً. وستعمل الآلة في هذه الحالة كمفاعلة او مكثفة متغيرة بزاوية معامل قدرة 90° متأخرة او متقدمة فيما يعرف بالمكثف التزامني كما سبق الاشارة اليه، ويمكن استخدامها لتنظيم جهد طرف الاستقبال لخطوط النقل الطويلة.

12.7 الآلة التزامنية بارزة الاقطاب.

تستخدم الآلات التزامنية بارزة الاقطاب حيث عادةً ما يضم الدوار عدد كبير من الاقطاب البارزة في تطبيقات السرعات المنخفضة مثل مولدات محطات القوى الكهرومائية (hydroelectric) حيث يدار المولد بواسطة توربينات مائية منخفضة السرعة لا تتجاوز مئات الدورات في الدقيقة والمحركات المستخدمة في الصناعات التي تتطلب سرعات ثابتة وبطيئة. وتتميز آلات الدوار بارزة الاقطاب عن آلة الدوار الاسطواني بعدم انتظام الثغرة الهوائية حيث تكون القيمة الصغرى لممانعة المسار المغناطيسي على طول محور القطب المار بمركزه والذي يعرف بالمحور المباشر *d-axis* وتكون قيمتها العظمى على طول المحور عبر منتصف المسافة بين القطبين والذي يعرف بالمحور المتعامد *q-axis* والذي يتأخر 90° عن *d-axis*.

وبالعودة الى آلات الدوار الاسطواني تبين ان ق.د.م رد فعل المنتج F_{ar} التي تنشئ فيض منتظم في الثغرة الهوائية المنتظمة في الحالة الثابتة حيث يمكن اخذها بالحسبان في الدائرة المكافئة للآلة بهبوط الجهد في مفاعلة رد فعل المنتج X_{ar} وكما سبق ذكره. ويستند افتراض انتظام الثغرة الهوائية في آلة الدوار الاسطواني الى اهمال التأثير المحدود الاسنان والشقوب على سطح الدوار. ولكن التحليل السابق لن يكون مقبولاً عند عدم انتظام الثغرة الهوائية كما هو الحال في الآلات التزامنية ذات الاقطاب البارزة. ويعوذ ذلك لعدم جواز تمثيل ق.د.م رد فعل المنتج بمفاعلة رد فعل منتج واحدة لكونها ستنشئ فيض اكثر على طول محور القطب وفيض اقل على طول المحور البيني الفاصل بين الاقطاب في المنتصف.

وبملاحظة تطابق ق.د.م على التيار الناشئ لها وتأخر ق.د.ك $90°$ عن الفيض وق.د.م المنتجان لها يمكن توضيح تأثير بروز الاقطاب على توزيع ق.د.م وفيض الثغرة الهوائية كما في الشكل (18) حيث تعمل ق.د.م وفيض المجال F_f و Φ_f دائماً على طول المحور المباشر *d-axis*. ويبين الشكل ($18a$) توزيع ق.د.م والفيض لحالة تيار منتج I_a منطبق طورياً على ق.د.ك الاثارة E_f. وستكون ق.د.م رد فعل المنتج F_{ar} متأخرة $90°$ عن ق.د.م المجال F_f وتعمل على طول المحور المتعامد *q-axis* وتنشئ فيض Φ_{ar} اصغر لكونها تعمل على طول المحور الاكبر ممانعة. وفي المقابل يبين الشكل ($18b$) توزيع ق.د.م والفيض لتيار I_a متأخر $90°$ عن E_f حيث ستكون F_{ar} متأخرة $180°$ عن F_f. وستعمل F_{ar} وفي هذه الحالة على طول المحور المباشر *d-axis* وفي عكس اتجاه F_f وتنشئ فيض Φ_{ar} اكبر لكونها تعمل على طول المحور الاقل ممانعة.



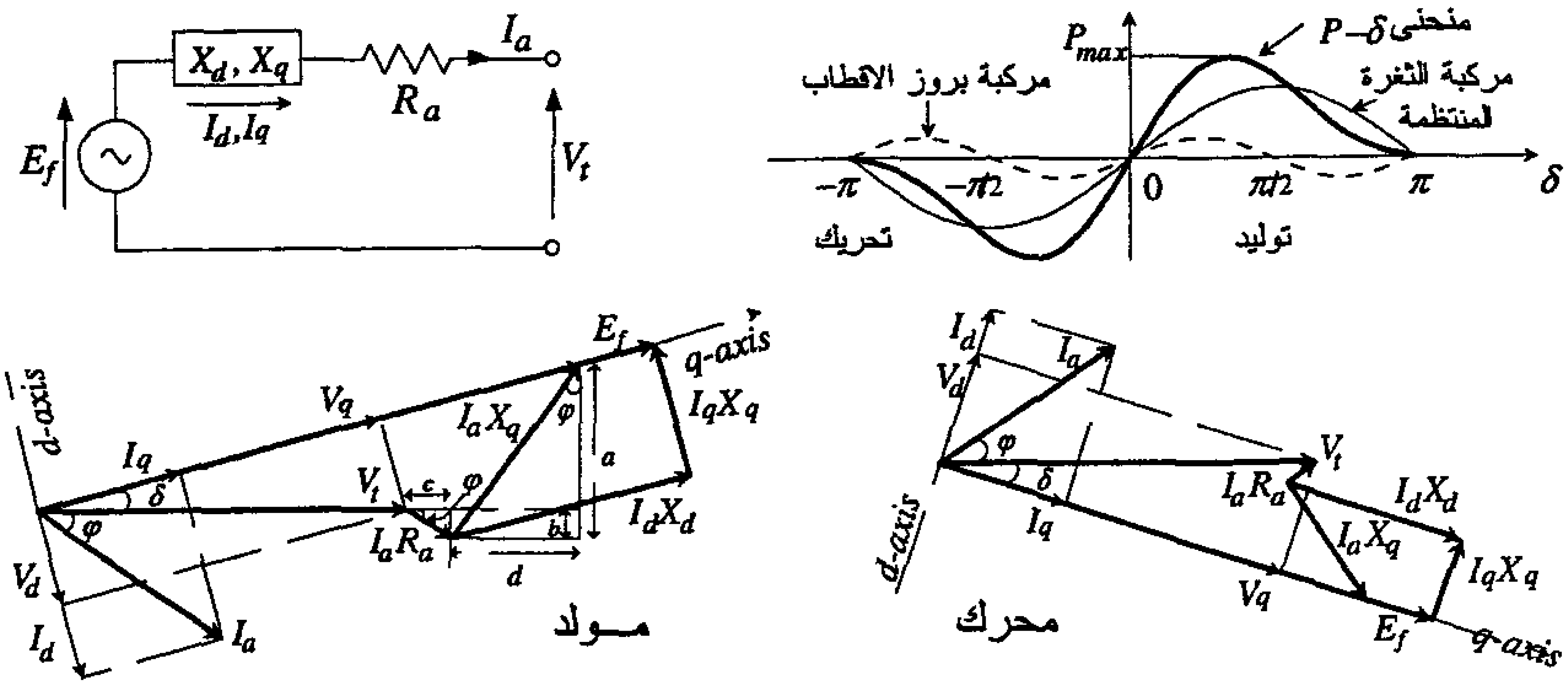
شكل (18) قدم وفيض الآلة التزامنية بارزة الاقطاب.

وعليه ستكون مفاعلة رد فعل المنتج X_{ar} اكبر عندما يكون I_a متأخراً عن E_f مقارنة بقيمتها عندما يكون I_a منطبقاً على E_f ولن يكون لمفاعلة رد فعل المنتج قيمة ثابتة لاعتمادها على معامل قدرة I_a. وللتغلب على ذلك يتم تحليل F_{ar} الى مركبتين هما F_d تنشئ Φ_{ad} وتعمل على المحور المباشر ضد F_f، و F_q تنشئ Φ_{aq} وتعمل على المحور المتعامد كما في الشكل (18c). ويقود تحليل F_{ar} الى F_d و F_q الى تحليل I_a الى مركبة مباشرة I_d تنتج F_d، ومركبة متعامدة I_q تنتج F_q. ويجب التمييز بين المركبتين I_d و I_q اللتين تمثل E_f محور اسنادهما، ومركبتي I_a الحقيقية والتخيلية اللتين يمثل V_t محور اسنادهما.

ولكون كل من مركبتي فيض رد فعل المنتج Φ_{ad} و Φ_{aq} تتدفق عبر مسار ذو ممانعة ثابتة يمكن تمثيلهما بمفاعلات ثابتة. ولذلك يمكن اخذ تأثير مركبتي رد فعل المنتج في الحسبان بتحليل مفاعلة رد فعل المنتج X_{ar} الى X_{ad} على المحور المباشر و X_{aq} على المحور المتعامد. ويقود ذلك الى تحليل المفاعلة التزامنية X_s الى مفاعلة المحور المباشر X_d ومفاعلة المحور المتعامد X_q حيث $X_d>X_q$ وتبلغ X_q ما بين 50٪ الى 80٪ من X_d. وستشمل كل من X_d و X_q مفاعلة التسرب X_{al} كما في المعادلة (7.27). ويمكن التعبير هاتين المفاعلتين كما يلي:

$$X_d = X_{al} + X_{ad}\,, \quad X_q = X_{al} + X_{aq} \qquad (7.58)$$

وعليه يمكن في الحالة الثابتة نمذجة الآلة التزامنية ذات الاقطاب البارزة بدائرة مكافئة شبيهة بتلك المبينة في الشكل (16) تضم مصدر جهد تمثله ق.د.ك الاثارة E_f على التوالي مع مقاومة المنتج R_a وتضم مركبتي المفاعلة التزامنية X_d ويتدفق خلالها مركبة التيار المباشرة I_d و X_q ويتدفق خلالها مركبة التيار المباشرة I_q. ولذلك يجب تمثيل ق.د.ك رد فعل المنتج بمركبتي هبوط جهد متعامدتين هما I_dX_d تتقدم °90 (ومن تم تنطبق على E_f) على I_d و I_qX_q تتقدم I_q °90 (ومن تم تتعامد على E_f). وبذلك يمكن تمثيل الآلة ذات الدوار بارز الاقطاب بالدائرة المكافئة والمخطط الطوري المبين في الشكل (19) حيث:



شكل (19) المخططات الطورية للآلة التزامنية ذات الاقطاب البارزة.

$$E_f \angle\delta = V_a\angle 0 \; + \; \bar{I}_a R_a + j\bar{I}_d X_d + j\bar{I}_q X_q \qquad (7.59)$$

ويتطلب حساب المركبات المباشرة والمتعامدة للتيار معرفة الزاويتين δ و φ حيث عادة ما تكون فقط الزاوية φ معلومة. ويمكن من المخطط الطوري للمولد للمبين في الشكل (19) حساب δ ومن ثم مركبات التيار والقدرة لحالة المولد كما يلي:

$$\delta = tan^{-1}\left(\frac{a-b}{V_t + c + d}\right) = tan^{-1}\left(\frac{I_a X_q cos\varphi - I_a R_a sin\varphi}{V_t + I_a R_a cos\varphi + I_a X_q sin\varphi}\right)$$

(7.60)

وبمعرفة δ وعند اهمال مقاومة المنتج R_a يمكن من المخطط الطوري المبين في الشكل (19) التعبير عن جهود وتيارات المحورين والقدرة الفعالة والمتفاعلة الخارجة للمولد بارز الاقطاب ومنحنى القدرة- الزاوية المبين في الشكل (19) كما يلي:

$$V_q = V_t \cos \delta, \qquad V_d = V_t \sin \delta \tag{7.61}$$

$$I_q = I_a \cos(\phi+\delta) = [V_d + R_a I_a \sin(\phi+\delta)] / X_q \approx V_d / X_q = V_t \sin \delta / X_q \tag{7.62}$$

$$I_d = I_a \sin(\phi+\delta) = [E_f - V_q - R_a I_a \cos(\phi+\delta)]/X_d \approx (E_f - V_q)/X_d = (E_f - V_t \cos \delta)/X_d \tag{7.63}$$

$$S = V_t I_a^* = (V_d + jV_q)(I_d - jI_q) = (V_d I_d + V_q I_q) + j(V_q I_d - V_d I_q) = P + jQ \tag{7.64}$$

$$P = (V_t \sin \delta)(E_f - V_t \cos \delta)/X_d + (V_t \cos \delta)(V_t \sin \delta)/X_q$$

$$Q = (V_t \cos \delta)(E_f - V_t \cos \delta)/X_d - (V_t \sin \delta)(V_t \sin \delta)/X_q$$

$$P = \frac{V_t E_f}{X_d} sin\delta + \frac{1}{2} V_t^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) sin2\delta \tag{7.65}$$

$$Q = \frac{V_t E_f}{X_d} cos\delta - V_t^2 \left(\frac{sin^2\delta}{X_q} + \frac{cos^2\delta}{X_d}\right) \tag{7.66}$$

وعند استخدام نموذج آلة الدوار الاسطواني لتمثيل آلة الاقطاب البارزة حيث $X_S=X_d$ ستعطى ق.د.ك المكافئة بالمعادلة (47.7) وستكون اكبر مقداراً وازاحة من ق.د.ك الفعلية وهو ما يبين خطأ ذلك خصوصا عندى مستوى الاثارة العالي.

13.7 تزامن المولدات التزامنية العاملة على التوازي.

ان جميع المولدات العاملة في محطات توليد الطاقة الكهربائية في العالم هي مولدات تزامنية والتي تعرف احياناً بالمناوبات (alternators) ويعود ذلك لميزات التيار المتردد الناتج عنها وثبوت ترددها ومرونة وإمكانيات التحكم في جهودها وقدراتها. ولا يكاد يوجد اليوم أي مولد او محطة تعمل معزولة في منظومات القوى الكهربائية، باستثناء المنظومات الخاصة مثل السفن. وتضم منظومات ومحطات القوى حسب حجمها عشرات او مئات المولدات التي تعمل على التوازي لتغذي شبكة نقل واحدة. وعادة ما ينظر لشبكة النقل العامة التي ترتبط بها وحدات التوليد في المنظومة كقضيب عمومي لانهائي (infinite busbar) ذو جهد وتردد ثابتين لا يمكن لأي مولد ان يغير جهده او تردده بمفرده.

وتعرف عملية ربط المولدات التزامنية للعمل على التوازي بالتزامن (synchronization) حيث ستعمل المولدات المتوازية متزامنةً أي بنفس التردد والسرعة التزامنية. ويمكن عند ادخال مولد الى القضيب العمومي اللانهائي لمنظومة القوى النظر الى القضيب اللانهائي كمولد كبير. وفي كل الاحوال يشترط لربط مولدين على التوازي تحقيق الشروط التالية قبل الربط:

1 – ان تكون جهود الخطوط المناظرة في المولدين متساوية في المقادير ومنطبقة طورياً. وسيؤدي الفرق بين المتجهات الطورية للجهود الى تدفق تيار دوار كبير بين المولين قد يبلغ قيم خطره. ولن تعمل الآلتين في هذه الحالة كمولدين متوازيين، ولكن الاكبر جهداً بينهما ستعمل كمولد بينما تعمل الاقل جهداً كمحرك.

2 – ان يكون تتابع الاطوار واحداً في المولدين. وسيؤدي اختلاف تتابع الاطوار الى عدم تطابق جهود الخطوط المناظرة طورياً مما يؤدي الى

تـدفق تيـار دوار بـين المولـدين يمكـن ان يكـون خطـراً. فـإذا كـان تتـابع اطـوار a-b-c في احـد المولـدين و a-c-b في الآخـر سـينتج ذلـك ازاحـة طورية $120°$ بين جهود خطي b وخطي c.

3 – ان يكـون تـردد تيـار المولـدين ومـن ثـم سـرعاتها التزامنيـة متسـاوية. وسـيؤدي الاخـتلاف بـين تـردد المولـدين الى الـتغير المسـتمر في الازاحـة الطوريـة بـين الخطـوط المنـاظرة. وسـينتج عـن ذلـك تـدفق تيـارات عـابرة مـتغيرة بـين اللآلـتين اللـتين سـتتبادلان الادوار بـين التوليـد والتحريـك بشكل متواصل وهو امر في غاية الخطورة.

ويمكـن تلخيص الخطـوات الـلازم اتباعهـا قبـل إدخـال مولـد علـى قضيب لانهائي او على التوازي مع مولد آخر عامل فيما يلي:

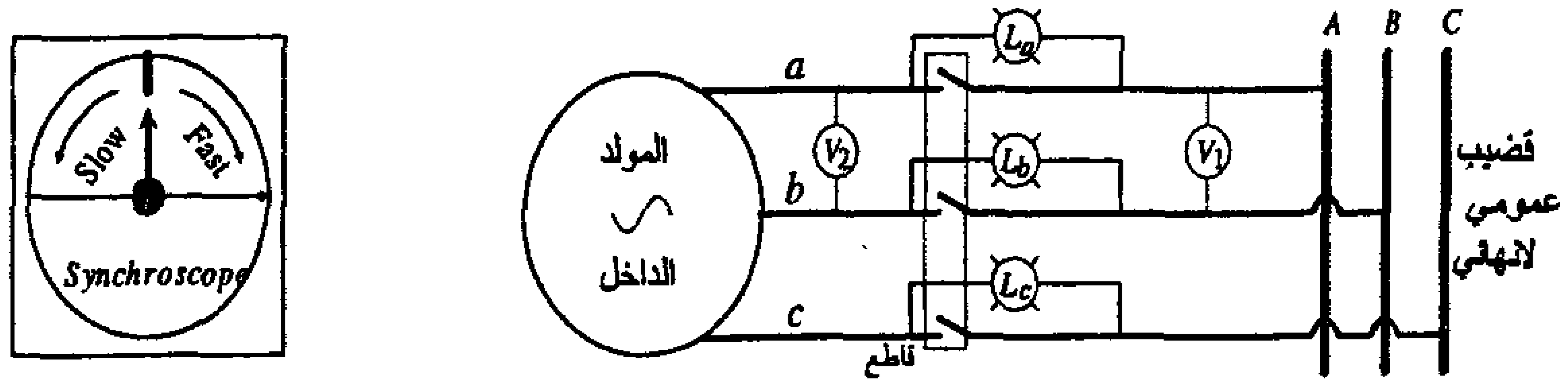
1 – ضبط سرعة المحرك الاولى الذي يدير المولد الداخل للحصول علـى تـردد التيار الصحيح.

2 – ضبط تيار مجال ومن ثم مستوى اثارة المولد الـداخل للحصـول علـى جهـد اطراف صحيح.

3 – التأكـد من تطابق تتابع الاطوار في المولد الداخل مـع القضـيب اللانهـائي او المولد العامل.

ويمكـن في الخطـوتين (1،2) التأكـد مـن ضـبط تـردد وجهـد المولـد الـداخل لقـيم النظـام العامـل باسـتخدام جهـازي قيـاس الـتردد والجهـد. ومـن الطرق البسيطة الممكن استخدامها في الخطـوة (3) طريقـة المصـابيح الثلاثـة التي يتم توصيلها كما في الشكل (20)، فإذا وجد ان المصابيح تتوهج وتعتم مع بعضـها الـبعض سيشير ذلـك الى تطـابق تتـابع الاطـوار بـين المولـد الـداخل والنظـام العامـل. كمـا يمكـن الاسـتفادة مـن المصـابيح الثلاثـة للتحقـق مـن تطـابق جهـد المولـد الـداخل طوريـاً مـع النظـام العامـل حيـث سـتعتم المصـابيح

الثلاثة عندما تكون جهود الخطوط على طرفيها متساوية في مقاديرها ومنطبقة طورياً. وفي الحياة العملية يتم استخدام جهاز كاشف التزامن (synchroscope) المبين في الشكل (20) الذي قيس زاوية الطور بين الجهود لضمان تطابقها طورياً.



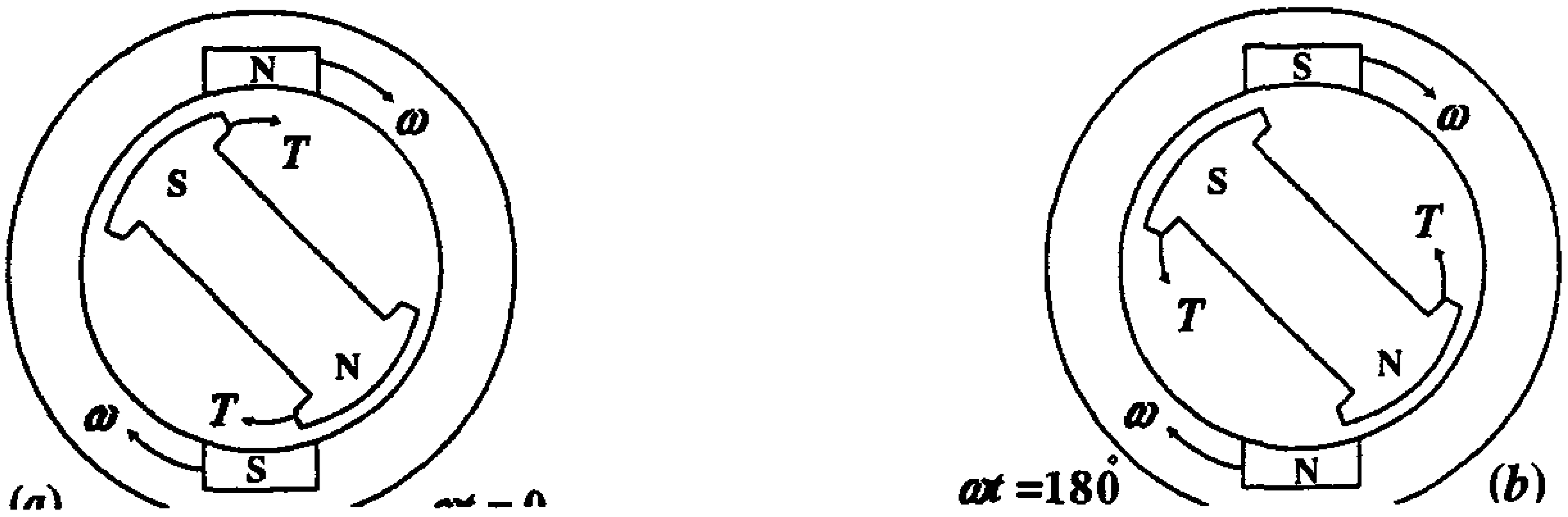
شكل (20) خصائص المولد التزامني لقدرة ثابتة.

ومن الطرق الاحدث لإدخال مولد على قضيب لانهائي طريقة التزامن الذاتي (self-synchronization) وفيها يتم ضبط تردد المولد الداخل ليساوي تردد النظام بدون تطبيق جهد على دائرة المجال. وبدلاً من مصدر الاثارة يتم توصيل مقاومة خارجية ويغلق قاطع ربط المولد مع النظام حيث ستعمل المقاومة الخارجية في الدوار على الحد من الزيادة المفرطة في تيار المنتج. وبعد اتمام عملية الربط يتم تطبيق جهد الاثارة على دائرة المجال وتخرج المقاومة الخارجية من المولد الداخل الذي سيزامن نفسه من النظام العامل بسهولة آمان. ويميز هذه الطريقة سرعتها وعدم حاجتها لأجهزة اضافية. وفي الحياة العملية يلحق بوحدات التوليد اثنان من انظمة التحكم الذاتي الاساسية التي تتولى ضبط جهد وسرعة (تردد) المولد. وهما نظام الاثارة (excitation system) الذي يضبط مستوى الاثارة لتثبيت جهد المولد ذاتياً مع تغير حمولته ويمثل منظم الجهد الذاتي (AVR) اهم اجزاءه، ونظام التحكم في السرعة (speed-governing system) الذي يتولى ضبط قدرة المحرك الاولى واتزانها مع قدرة الحمولة لضمان ثبوت سرعة وتردد المولد ذاتياً ويمثل حاكم السرعة (governor) اهم اجزاءه.

14.7 بدء المحركات التزامنية.

يميز الآلات التزامنية مثلها مثل آلات التيار المستمر امكانية الاستخدام المعكوس (reversible application) بحيث يمكن استخدام نفس الآلة كمولد يغذي حمل كهربائي عند ادارته بمحرك اولى ميكانيكي او كمحرك يدير حمل ميكانيكي عند تغذيته من مصدر كهربائي. وبصفة عامة لا يوجد اختلاف يذكر بين بنية المحرك التزامني والمولد التزامني حيث يمكن ان يكون المحرك مثله مثل المولد اسطواني الدوار او بارز الاقطاب. وفي الحياة العملية غالباً ما يقتصر استخدام المحركات التزامنية علي التطبيقات ذات السرعات المنخفضة والتي تتطلب احمالها سرعات تتراوح بين 125 rpm و 1000 rpm. ويعود ذلك الى حقيقة ان المحركات الحية ستتفوق على المحركات التزامنية في ميزاتها الفنية والاقتصادية عند السرعات العالية. ولذاك غالباً ما تكون المحركات التزامنية ذات اقطاب ابارزة لكونها الانسب للسرعات المنخفضة.

ومن اهم ما يميز المحركات التزامنية ثبوت السرعة اذ انه لايمكن للمحرك التزامني ان يبدل عزم ميكانيكي ثابت الا عند سرعة التزامن التي يحددها تردد المصدر وليس الحمولة، وفي المقابل يعيب المحرك التزامني كونه غير ذاتي البدء. فعند ربط لفائف المنتج ثلاثية الطور في الساكن بمصدر تيار متردد واثارة لفائف المجال في الدوار بتيار مستمر عند السكون لن يبدء دوار المحرك في الدوران تلقائياً ولكنه سيتأرج في اتجاهين متضادين دون مواصلة الدوران في اتجاه واحد. ويمكن لفهم مشكلة بدء المحرك التزامني النظر الى آلة تزامنية ثلاثية الطور ذات قطبين بارزين تغذى من مصدر متردد حيث سينشئ تيار المنتج ق.د.م دوارة يمكن تمثيلها بقطبين يدوران في محيط الثغرة الهوائية بسرعة التزامن كما في الشكل (21).



شكل (21) عزم البدء في المحرك التزامني ثنائي الاقطاب.

واذا كان موضع قطبي ق.د.م الدوارة المكافئين عند $\omega t=0$ كما في الشكل (21a) سيعمل قطبي ق.د.م الدوارة على جذب قطبي الدوار ليكونا على استقامة واحدة معهما. وبذلك سيتعرض الدوار الى عزم يحاول تدويره في اتجاه عقارب الساعة. وبطبيعتها ستعكس ق.د.م الدوارة اتجاهها في كل نصف دورة حيث يكون موضع قطبيها عند $\omega t=\pi$ كما في الشكل (21b). ولكن عزم القصور الذاتي للدوار لن يسمح بتغير موضعه بقدر يذكر في نصف دورة ق.د.م ليبقى تقريباً في نفس موضعه. وكما في الشكل (21b) ستعرض محاولة استقامة قطبي الدوار مع قطبي ق.د.م الدوارة في هذه الحالة الدوار الى عزم يحاول تدويره ضد اتجاه عقارب الساعة، وهو ما يجعل محصلة عزم البدء في الدورة الكاملة صفراً. وهكذا فإن سرعة ق.د.م الدوارة العالية لن تمكن قطبي الدوار (الساكنة) من تعقب قطبي ق.د.م الدوارة والتعلق بهما ولن يتمكن المحرك من البدء.

ولذلك يتطلب بدء المحرك التزامني وسائل بدء اضافية للوصول به الى سرعة التزامن التي يمكن للمحرك ان يستقر عندها. وعادةً مايتم استخدام احدى الطرق التالية لبدء المحرك التزامني.

1 – البدء الحثي: وفيها تقوم لفائف الاخماد في الدوار بدور القفص السنجابي في المحرك الحثي حيث تترك لفائف المجال دون تغذية ليبدأ المحرك دورانه كمحرك حثي الى ان يصل سرعة قريبة من سرعة

التـزامن حيـث سـتتعقب اقطـاب الـدوار اقطـاب ق.د.م الـدوارة متخلفـة عنهـا بسـرعة انـزلاق صـغيرة جـداً. وعنـد تغذيـة اقطـاب المجـال بتيـار مسـتمر سـتنجذب اقطـاب الـدوار بسـهولة الى اقطـاب ق.د.م الـدوارة وتتعلـق بهـا لتـدور معهـا بسـرعة التـزامن. وعنـد وصـول الـدوار لسـرعة التـزامن سـتنعدم السـرعة النسـبية بـين قضبـان لفـائف الاخمـاد وق.د.م الدوارة لتصبح هذه اللفائف هامدة لا جهد فيها ولاتيار.

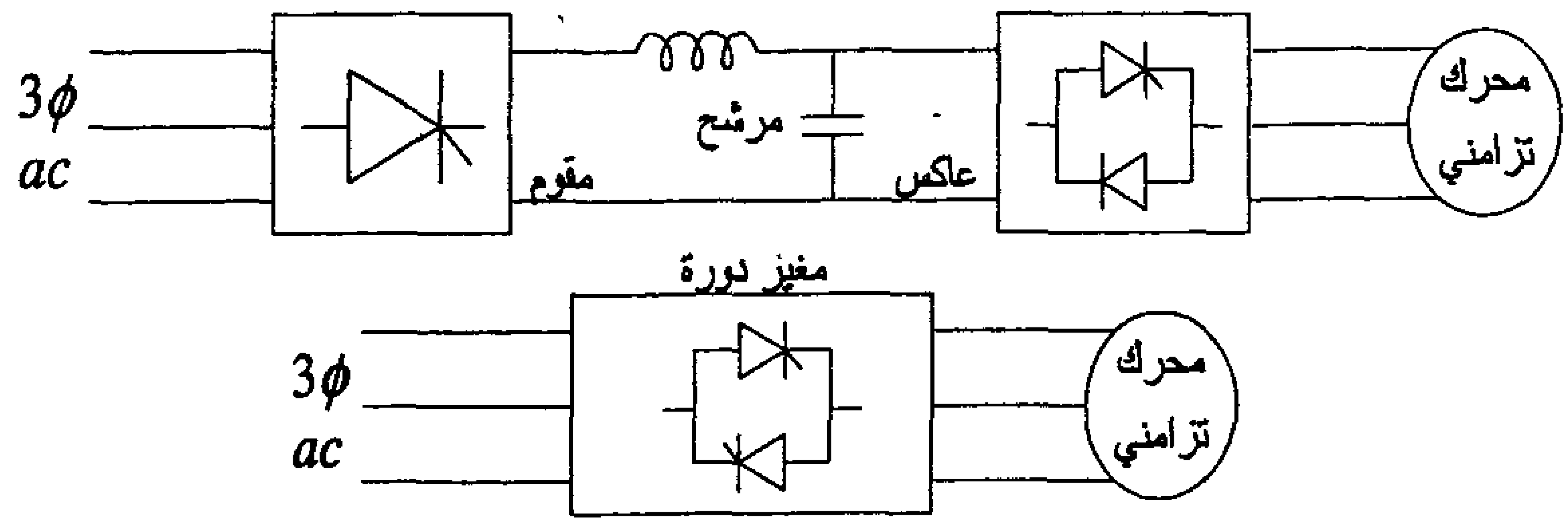
2 – البـدء بـتغير الـتردد: ويسـتخدم لتغذيـة المحـرك التـزامني في هـذه الطريقـة مصدر يمكـن تغيير تردده من الصفر الى التردد الاساسـي. وعنـد البـدء يـتم ضـبط الـتردد عنـد قيمـة صـغيرة جـداً لتـدور ق.د.م الـدوارة بسـرعة بطيئة تمكن اقطاب الدوار من تعقبها والدوران معها. وعندها يتم رفـع تـردد المصـدر تـدريجياً لترتفـع معـه سـرعة الـدوار تـدريجياً الى ان يصـل السـرعة التزامنية عند التردد المقنن. ويعيب هذه الطريقة مقارنة بطريقة البدء الحثي ارتفاع تكلفتها، ولكنها تفيـذ في الحـالـلات التي تتطلـب تشغيل المحرك التزامني عند سرعات متغيرة.

3 – البـدء بواسـطة محـرك مسـاعد: وتتطلـب هـذه الطريقـة اسـتخدام محـرك تيـار مسـتمر او محـرك حثـي مسـاعد ذو قـدرة وسـرعة مناسـبة لبـدء تشغيل الآلة التزامنية كمولد يـدار بسـرعة التـزامن ويتم تغذية لفـائف مجاله بالتيار المستمر وتزامنه مع المصدر وفقاً لشـروط تـزامن المولـدات التزامنيـة. وبعـد انتهـاء عمليـة التـزامن يـتم فصـل المحـرك المسـاعد ميكانيكيـاً عـن عمـود دوران الآلـة التزامنيـة الـتي سـتتحول تلقائيـاً للعمل كمحـرك يـدور يسـرعة التـزامن. ومـن الواضـح ان هـذه الطريقـة مكلفة اقتصادياً ولذلك فهي نادرة الاستخدام في الحياة العملية.

15.7 التحكم في سرعة المحركات التزامنية.

عند ثبوث التردد يعمل المحرك التزامني، مالم يفقد المحرك تزامنه، بسرعة ثابتة حتى عند تغير ظروف الحمل. ولذلك يناسب المحرك التزامني التطبيقات التي تتطلب التحكم الدقيق في السرعة والتي تتطلب عدة محركات تعمل متزامنة بنفس السرعة. ويتزايد استخدام المحركات التزامنية في انظمة التحريك متغيرة السرعة لامكانية تشغيلها بمعامل قدرة وكفاءة مرتفعيين مقارنةً بالمحركات الحثية، خصوصاً في ضل التطور الهائل الذي يشهده مجال الكترونيات القوى وبما يوفره من مغيرات قدرة محكومة منخفضة التكلفة ومرتفعة الكفاءة. وعادةً ما يتم التحكم في سرعة المحركات التزامنية باحدى طريقتين وهما:

1 – التحكم الترددي: وتقوم هذه الطريقة على استخدام منظومة مقوم-عاكس (rectifier-inverter) او منظومة مغير دورة (cycloconverters) وبما يسمح جهد وتردد خرج منظومة التغذية وكما هو مبين في الشكل (22). وللحصول على نفس العزم الاعظم على كامل المدى الذي تتغير فيه السرعة وللحد من التشبع المغناطيسي في الآلة يجب تغيير الجهد مع تغيير التردد. وبالنظر الى محرك تزامني ذو دوار اسطواني ومقاومة منتج مهملة يمكن من المعادلة (7.53) التعبير عن العلاقة بين العزم الميكانيكي وتردد وجهد المصدر كما يلي:



شكل (22) منظومات التحكم الترددي في سرعة المحرك التزامني.

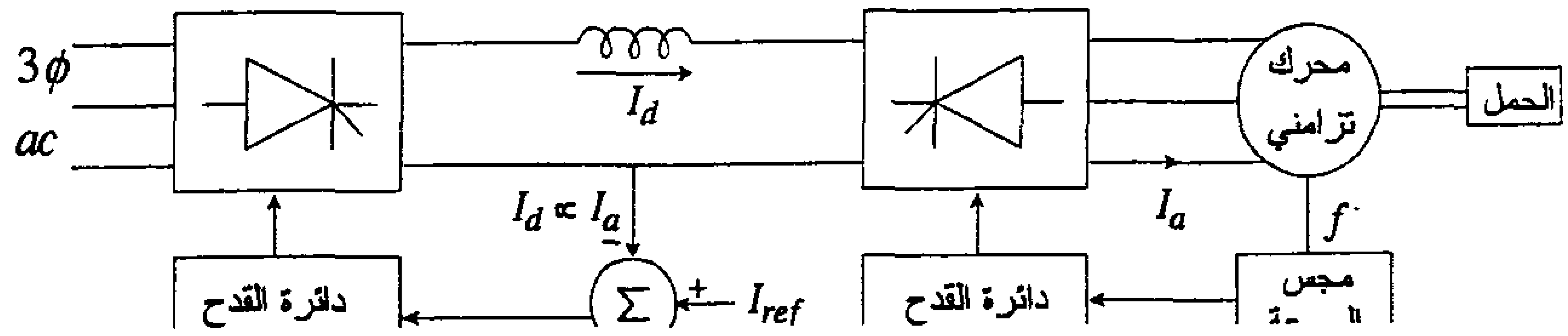
$$T_m = \frac{P}{\omega_m} = \frac{V_t E_f}{\omega_m X_s} sin\delta \qquad (7.67)$$

وعند ثبوت تيار الاثارة تتناسب قيمة ق.د.ك الاثارة Ef طردياً مع سرعة ق.د.م الدوارة (السرعة التزامنية) ومن ثم تتناسب طردياً مع تردد المصدر. وعليه يمكن بالتعويض عن ق.د.ك الاثارة وسرعة الدوران الميكانيكية والمفاعلة التزامنية Xs التعبير عن العزم الميكانيكي Tm كدالة في جهد وتردد المصدر كما يلي:

$$Ef = Kff, \quad Xs = 2\pi f Ls, \quad \omega m = 2\pi f / p$$
(7.68)

$$T_m = \frac{V_t E_f}{\omega_m X_s} sin\delta = \frac{V_t (K_f f)}{(2\pi f / p)(2\pi f L_s)} sin\delta = K_t \frac{V_t}{f} sin\delta \qquad (7.69)$$

2 – التحكم الذاتي في السرعة: يعيب منظومات التحكم السابقة امكانية فقد المحرك التزامني لتزامنه اذا ما تعرض لاضطراب في حمولته. فأذا ارتفعت حمولة المحرك فجأة ستنخفض سرعة المحرك لحظياً وقد تزداد زاوية القدرة δ في الشكل (13) لتتجاوز 90^o وتتسبب في فقدان تزامن المحرك. ويمكن في انظمة التحكم الذاتي في السرعة التغلب على هذه المشكلة بخفض التردد عند انخفاض السرعة للحفاظ على التزامن. ويبين الشكل (23) منظومة تحكم ذاتي في سرعة المحرك التزامني تستخدم اثنان من المقومات المحكومة يعمل الاول المتصل بالمصدر في نمط تقويم ويتم تبديله ذاتياً بجهد خط المصدر، ويعمل الثاني المتصل بالمحرك في نمط عاكس ويتم تبديله ذاتياً بجهد الاثارة.



شكل (23) منظومة التحكم الذاتي في سرعة المحرك التزامني.

16.7 أمثلة محلولة

1- مولد تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة ذو 8 اقطاب وتردد 60 Hz يضم ساكنه 96 شقب ولفائف موزعة قصيرة باع ملفاتها 10 شقوب، وبكل شقب 4 موصلات مقنن تيارها A 650. فأذا كانت ملفات كل طور موصلة على التوالي والقيمة العظى لفيض التغرة الهوائية 60 mWb لكل قطب، احسب مقننات جهد وقدرة المولد. [1.64 KV, 1846 KVA]

الحل:

2P=8 , f=60 Hz ,S= 96 slot ,yc=10 slot, Z=4 cond/slot ,I=650 A

ϕ=60mWb.

τ= S/2P=96/8= 12 slot/pole , α=180/τ =15 e° ,β=(τ-yc)α=30 e°

m=S/3*2P=4 , N=Z*S/(2*No.ph)=4*96/(3*2)=64 turns

Kd= sin (mα/2)/(m sin(α/2))=0.957

Kp= cos (β/2)=0.9659

Kw=Kp*Kp=

E=$\sqrt{3}$*4.443 fNϕ Kw=1.64 KV.

P= 3IE=1846 KVA.

2 – مولد تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقنناته 450 KVA، 4.6 KV، 60 Hz ومقاومة لفائف منتجه 2 Ω لكل طور ومفاعلته التزامنية 5 Ω لكل طور. احسب ق.د.ك المحثثة اللازمة للحفاظ على جهد الاطراف المقنن عند تغذية المولد لحمل تام بمعامل قدرة (أ) واحد، (ب) 0.75 متأخر، (ج) 0.75 متقدم. [4.82 KV, 5.075 KV, 4.45 KV]

الحل:

$S=450KVA, V=4.6KV, Ra=2\Omega, Xs=5\Omega$

$I=S/V=450/4.6=97.82\ A$

$E\angle\delta= V\angle 0+I\angle\Phi(Ra+jXs)$

عامل القدرة يساوى واحد اى $\Phi = 0$

$E\angle\delta= 4600\angle 0+97.82\angle 0(2+j5)=4820.586\angle 5.822\ V$

عامل القدرة يساوى 0.75 متأخر اى $\Phi = -36.86$

$E\angle\delta= 4600\angle 0+97.82\angle -36.86(2+j5)=5075\angle 2.68\ V$

عامل القدرة يساوى 0.75 متقدم اى $\Phi = 36.86$

$E\angle\delta= 4600\angle 0+97.82\angle 36.86(2+j5)=4451\angle 6.4\ V$

3 – مولد تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقنناته 10 KVA، 230 V، 50 Hz ومقاومة لفائف منتجه 0.5 Ω لكل طور ومفاعلته التزامنية 1.2 Ω لكل طور. احسب ق.د.ك اللاحمل والنسبة المئوية لتنظيم جهد اطراف المولد عند تغذية حمل تام بجهد 230 V ومعامل قدرة (أ) 0.8 متأخر، (ب) 0.8 متقدم. [280.2 V, 21.81%, 222.9 V, -3.08%]

4 - مولد تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقاومة لفائف منتجه 0.5 Ω لكل طور ومفاعلته التزامنية 5 Ω لكل طور. فأذا تم تثبيت مستوى الاثارة ليكون جهد اللاحمل 6.6 KV، احسب جهد الاطراف والنسبة المئوية لتنظيم الجهد عند تغذية حمولة تسحب 130 A بمعامل قدرة (أ) 0.8 متأخر، (ب) 0.6 متقدم.
[5781.64 V, 14.15%, 7388.56 V, -10.67%]

5 - مولد تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقنناته 1 MVA، 3.6 KV تم تسجيل النتائج التالية من اختبارات الدائرة المفتوحة والدائرة المقصورة. احسب المفاعلة التزامنية غير المتشبعة والمتشبعة ونسبة القصر (ملاحظة: يمكن اجراء الحسابات بدون الرسم البياني بحساب ميل خط الثغرة الهوائية وخط الدائرة المقصورة من قيم النقطة الاولى). [8.2 Ω, 7.70 Ω, 1.68]

I_f(A)	60	70	80	90	100	110
E_o (line)	2560	3000	3360	3600	3800	3960

I_f (A)	60
I_{sc} (A)	180

6 - مولد تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقنناته 45 KVA، 220 V تم تسجيل احداثيات النقاط التالية من منحنيات اختباره: (220 V_l, 2.84 A) على منحنى OCC، (202 V_l, 2.2 A) على خط الثغرة الهوائية AGL، (118 A, 2.2 A) على منحنى الدائرة المقصورة SCC. احسب قيم المفاعلة التزامنية غير المتشبعة والمتشبعة. [0.988 Ω, 0.834 Ω, 1.29]

7 - محرك تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقنناته 800 KW، 2 KV، 50 Hz ومقاومة لفائف منتجه 0.2 Ω لكل طور ومفاعلته

التزامنية Ω 1.9 لكل طور. فأذا كان المحرك يدير حمل تام، اهمل جميع الفقودات واحسب ق.د.ك وزاوية القدرة عند سحب تيار مقنن بمعامل قدرة: (أ) 0.8 متأخر، (ب) 0.8 متقدم.
[1520.7∠-27.4° V, 2621.5 ∠-18.2° V]

8 - محرك تزامني ثلاثي الطور توصيلة نجمة مقنناته 2 KV، 1500 RPM ومفاعلته التزامنية Ω 3 لكل طور ومقاومة لفائف منتجه مهملة تم تثبيت تيار المجال لتكون ق.د.ك الاثارة مساوية لجهد الاطراف. فأذا كان التيار الذي يسحبه المحرك من المصدر 200 A احسب القدرة المسحوبة ومعامل القدرة والعزم المبدول. [669 KW, 0.965 lead, 4259.2 Nm]

9 - مولد تزامني ثلاثي الطور بارز الاقطاب مقنناته 121 MVA، 11 KV ومفاعلات محوريه المباشر والمتعامد Ω 1.00 و Ω 0.60 لكل طور، اهمل جميع المفاقيد واحسب زاوية القدرة ومركبتي التيار المباشرة I_d والمتعامدة I_q وق.د.ك الاثارة عند تغدية حمولة مقننة بمعامل قدرة 0.8 متأخر وجهد اطراف مقنن.
[19.44°, 5284.2 A, 3522.8 A, 19.525 KV]

10- محرك تزامني ثلاثي الطور بارز الاقطاب مقنناته 2000 hp، 2300 V ومفاعلات محوريه المباشر والمتعامد Ω 1.95 و 1.40 Ω لكل طور، اهمل جميع المفاقيد واحسب زاوية وقيمة القدرة الفعالة العظمى التي يمكن للمحرك ان يبدلها اثناء تغديته من مصدر جهد ثابت 2300 V مع ثبوت الاثارة عند قيمة تنتج القدرة المقننة بمعامل قدرة 1.0. [73.2°, 3235 KW]

11- مولد تزامني ثلاثي الطور ذو 32 قطب بارزة مقنناته 3.5 MVA، 6.6 KV ومفاعلات محوريه المباشر والمتعامد 9.6 Ω و 6.0 Ω لكل طور ومقاومة منتجه مهملة. احسب ق.د.ك وتنظيم الجهد عند تغذية حمولة 2.5 MW بمعامل قدرة 0.8 متأخر بالجهد المقنن، والقدرة العظمى الممكن توليدها عند فتح المجال.

[9.956 KV, 50.85%, 1.36125 MW]

الفصل الثامن

الآلات احادية الطور

الآلات احادية الطور

1.8- المقدمة

تمثل آلات التيار المتردد ثلاثية الطور الحثية والتزامنية وآلات التيار المستمر الكبيرة الانواع الاساسية الثلاثة للآلات الكهربائية بقدرات كبيرة تتراوح بين آحاد الكيلوواط الى عشرات الميجاواط وقد تصل الى مئات الميجاواط في حالة المولدات التزامنية. وتمثل هذه الآلات والتي يتم تصميمها للعمل المتواصل المعدات الاساسية لانتاج واستهلاك القدرة الكهربائية في محطات القوى ومنظومات التحويل الكهروميكانيكي للطاقة بشكل عام. فجميع محطات الطاقة الكهربائية في العالم وبمختلف مصادر الطاقة المستخدمة فيها تستخدم المولدات التزامنية ثلاثية الطور، كما ان الغالبية العظمى من المجمعات الصناعية والزراعية والتجارية الكبرى والصغرى تعتمد اساساً على المحركات الحثية ثلاثية الطور والى حد اقل على المحركات التزامنية ثلاثية الطور. وتتفق الانواع الاساسية للآلات الكهربائية في كونها تضم لفائف مجال بالاضافة الى اللفائف ثلاثية الطور في منتج آلات التيار المتردد ولفائف المبدل في منتج آلات التيار المستمر. كما انها تستند في عملها الى ظواهر محددة تتمثل في ق.د.م الدوارة للفائف المنتج ثلاثية الطور في آلات التيار المتردد، ودور التقويم للمبدل في لفائف منتج آلات التيار المستمر.

وفي المقابل تضم معظم البيوت والمكاتب والمعامل في المجتمعات الحديثة العديد من المحركات الصغيرة ومتناهية الصغر التي تدير بعض المعدات والادوات والاجهزة الخفيفة. وهذه المحركات وان كانت ذات قدرات صغيرة ومحدودة الا انها تفوق في اعدادها بملايين المرات الآلات

الكبيرة للانواع الاساسية. وتتراوح احجام وقدرات هذه الآلات من المحركات الصغيرة لمضخات المياه ومحركات المكيفات والثلاجات والغسالات والمكانس والخلاطات والمراوح الكهربائية المستخدمة في البيوت الحديثة وبقدرات تتراوح بين جزء من الى عدة كيلو- وات، الى المحركات الدقيقة متناهية الصغر والتي تدير رؤوس الطابعات وسواقات الاقراص والاشرطة في الحواسيب وغيرها من وسائل المعلوماتية والاعلام والترفيه بقدرات تتراوح بين جزء من الى الوات الى العشرات منه. وبشكل عام يمكن تصنيف المحركات الصغيرة الى محركات تيار متردد متواصلة العمل تعرف بمحركات احادية الطور وآلات الاغراض والاستخدامات الخاصة مقيدة العمل والتي تعرف بشكل عام بالآلات الخاصة.

ويمكن تصنيف محركات آلات التيار المتردد احادية الطور (single-phase motors) الصغيرة والتي تصمم للعمل المتواصل استناداً الى نظرية عملها وطبيعة لفائف عضويها السكن والدوار الى ثلاثة انواع رئيسية وهي:

1 – المحركات الحثية احادية الطور وهي تمثل الغالبية العظمى من الآلات الصغيرة وتصنف وفقاً لطريقة بدء حركتها لتشمل محركات القطب المحجوب (shaded-pole) ومحركات الطور المجزأ (split-phase) ومحركات المكثف بأنواعها.

2 – المحركات العامة (universal motor) احادية الطور والتي تعرف كذلك بمحركات التوالي ويميزها امكانية تغذيتها من مصدر تيار متردد او تيار مستمر. وبشبه بنيتها محركات التنافر (repulsion motors) النادر استخدامها اليوم.

3 - المحركات التزامنية احادية الطور وتستخدم في التطبيقات التي تتطلب سرعات ثابتة مثل الساعات والمؤقتات وغيرها. وهي تشمل كل من محركات الممانعة (reluctance-motor) ومحركات التخلف (hysteresis-motor).

وفي المقابل يمكن تصنيف الآلات الخاصة (special machines) والتي عادة ما تستخدم للعمل المقيد والمحدود في التطبيقات ذات الطبيعة الخاصة الى عدة انواع تتفاوت كثيراً في قدراتها ونظرية عملها، **والتي من اهمها:**

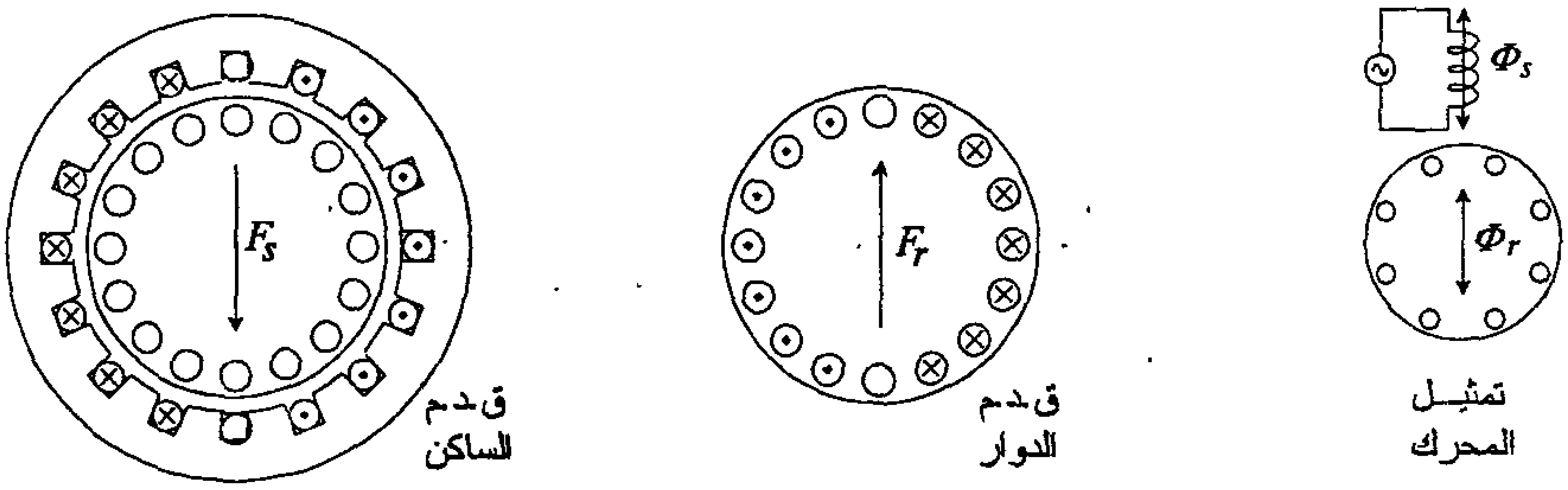
1 – المحركات المعززة (servomotors) والتي تستخدم اساساً في تطبيقات الحركة المقيدة في منظومات التحكم المختلفة مثل منظومات الروبوت والتوجيه وغيرها وتشمل المحركات المعززة احادية وثلاثية الطور ومحركات تيار مستمر.

2 – المتزامنات (synchros) وهي تقوم اساساً بتحويل الازاحات الدورانية الميكانيكية الى اشارات كهربائية وهي تستخدم في التطبيقات التي تتطلب مراقبة اوضاع اعمدة الدوران (shafts) كمنظومات التزامن بين اكثر عمود دوران.

3 – محركات الخطوة (stepper motors) ويميزها انها ذات دوران متقطع بزوايا محددة وفقاً للنبضات الكهربائية الداخلة. وهي تستخدم اساساً لتحويل الاشارات الرقمية الى حركة دورانية تناظرية في منظومات التحكم الرقمية.

2.8 المحركات الحثية احادية الطور.

تشبه المحركات الحثية احادية الطور في بنيتها المحركات الحثية ثلاثية الطور ذات القفص السنجابي، ولا تختلف عنها الا في ترتيب لفائف العضو الساكن. ويبين الشكل (1) مخطط مبسط لمحرك حثي احادي الطور بدوار ذو قفص سنجابي يضم عضوه الساكن لفائف احادية الطور. وتوزيع لفائف الساكن في شقوب لتنتج ق.د.م ذات توزيع قريب من الجيبي في الثغرة الهوائية، حيث يمكن لغرض التبسيط تمثيل هذه اللفائف بملف احادي مركز كما في الشكل (1). ولتبسيط تحليل ق.د.م الثغرة الهوائية يمكن اهمال الفيض المتسرب والتشبع المغناطيسي وافتراض التوزيع الجيبي لمجال ق.د.م الثغرة الهوائية. فاذا كان عدد اللفات الفعال للفائف الساكن N والتيار المتدفق خلالها جيبي وتوزيع ق.د.م الناتجة عنه ذات توزيع جيبي في الفراغ، يمكن التعبير عن التيار وق.د.م اللحظيين للفائف $\mathcal{F}$ عند أي نقطة في الثغرة الهوائية تبعد θ درجة عن محور اللفائف كما يلي:



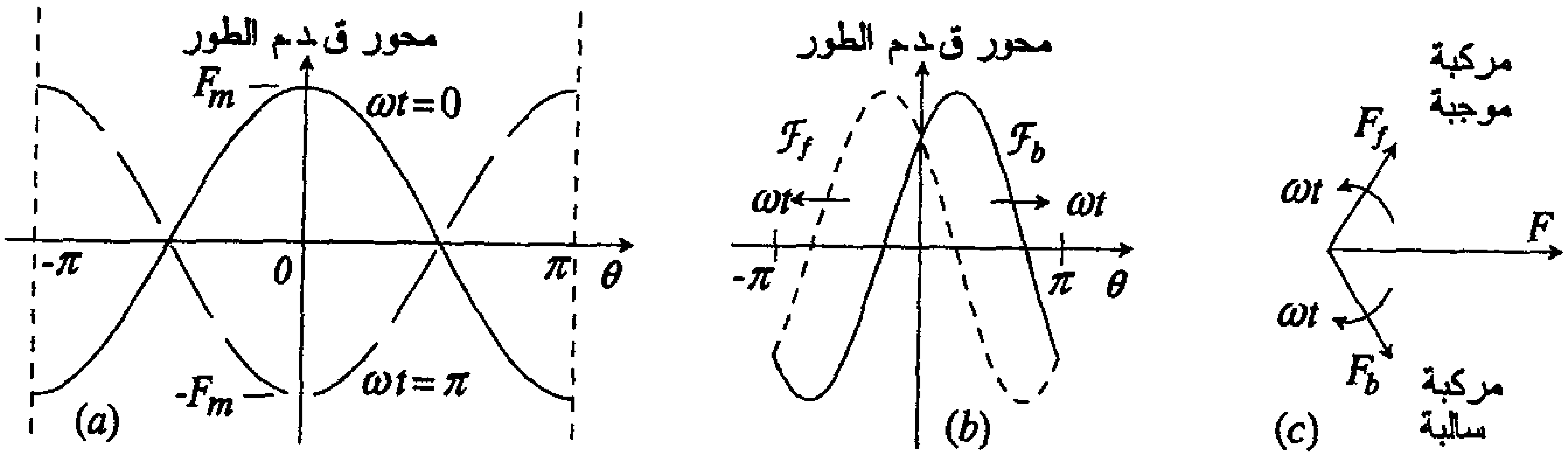
شكل (1) بنية وتمثيل المحرك الحثي احادي الطور.

$$i = I_m \cos \omega t \,, \ \mathcal{F} = N i \cos\theta = N I_m \cos\theta \ \cos\omega t$$
(8.1)

$$\mathcal{F} = \frac{1}{2} N I_m \{\cos(\omega t - \theta) + \cos(\omega t + \theta)\} = \mathcal{F}_f + \mathcal{F}_b \quad (8.2)$$

$$\mathcal{F}_f = \frac{1}{2} F_m \cos(\omega t - \theta), \qquad \mathcal{F}_b = \frac{1}{2} F_m \cos(\omega t + \theta) \qquad (8.3)$$

وتمثل ق.د.م اللفائف احادية الطور $\mathcal{F}$ في المعادلة (1) دالة جيبية نابضة على محور الملف كما هو مبين في الشكل $(2a)$ ويمكن تمثيلها كما في المعادلتين (8.2) و (8.3) بمركبتين دوارتين سعة كل منها نصف ق.د.م العظمى تدور الاولى $\mathcal{F}_f$ بسرعة التزامن في اتجاه امامي (موجب) وتدور الثانية $\mathcal{F}\ b$ بنفس السرعة في اتجاه عكسي (سالب). ويبين الشكل $(2b)$ مركبتي ق.د.م الامامية والعكسية، كما يبين الشكل $(2c)$ المتجهات الطورية لمحصلة ق.د.م والمركبتين الامامية والعكسية حيث تنتج كل منها مركبة فيض Φ مناظرة لها في الثغرة الهوائية. وبذلك ينتج تيار الساكن احادي الطور محصلة فيض نابضة غير دوارة.



شكل (2) ق.د.م لفائف منتج احادي الطور.

وكما في المحرك الحثي ثلاثي الطور سيؤدي فيض كل واحدة من مركبتي ق.د.م الساكن الدوارتين عند السكون الى احتثاث ق.د.ك وتدفق تيار في الدوار القفصي ينتج بدوره مركبة ق.د.م تنشئ مركبة فيض مناظرة للعضو الدوار. ووفقاً لقانون لينز ستكون مركبة فيض الدوار معاكسة لمركبة فيض الساكن المسببة لها. وسيؤدي تفاعل مركبتي ق.د.م الامامية والعكسية للساكن مع مركبتي ق.د.م

الامامية والعكسية للدوار الى انتاج عزم دوران يمكن تحليله الى اربعة مركبات مميزة وهي:

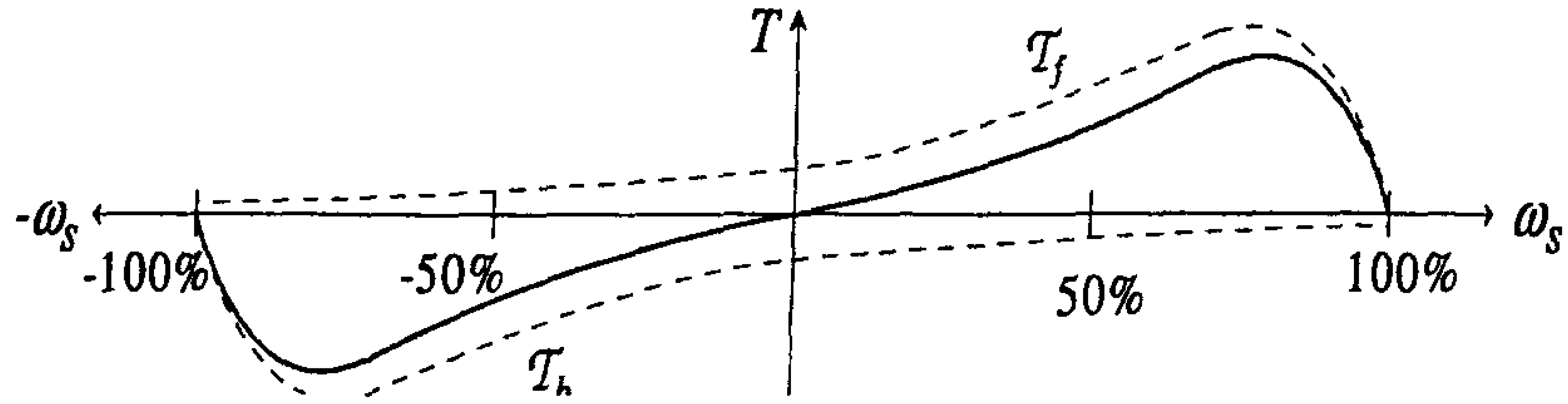
1 – المركبة الناتجة عن التفاعل بين ق.د.م الامامية للعضوين الساكن والدوار.

2 – المركبة الناتجة عن التفاعل بين ق.د.م العكسية للعضوين الساكن والدوار.

3 – المركبة الناتجة عن التفاعل بين ق.د.م الامامية للساكن وق.د.م والعكسية للدوار.

4 – المركبة الناتجة عن التفاعل بين ق.د.م والعكسية للساكن وق.د.م الامامية للدوار.

وستعطي المركبة الاولى عزم مستمر T_f يعمل على ادارة الدوار في الاتجاه الموجب كما في المحرك الحثي ثلاثي الطور، كما ستعطي المركبة الثانية عزم مستمر T_b مماثل يعمل على ادارة الدوار في الاتجاه السالب. وفي المقابل ستنتج المركبتين الثالثة والرابعة عزوم نابضة تنبض بتردد ضعف تردد تيار الساكن ليكون متوسطها صفراً ولا تساهم بأي عزم مستمر على الدوار. وبذلك تكون المركبتين الاولى والثانية فقط مسؤلتين عن انتاج العزم المستمر المبدول على دوار المحرك. واذا تم الحفاظ على تساوي مركبتي ق.د.م الامامية والعكسية عند الدوران ستعطي كل منها خاصية عزم/سرعة مماثلة لخاصية المحرك ثلاثي الطور ولكن في اتجاهين متعاكسين وكما هو مبين في الشكل (3).



شكل (3) خاصية العزم/السرعة للمحرك الحثي احادي الطور مع ثبوت قدم الامامية والعكسية.

ويتبين من الشكل (3) ان مركبتي العزم الامامية T_f والعكسية T_b متماثلتين تماماً لنفس السرعة ولكن في اتجاهين متعاكسين. ويمكن الحصول على منحنى محصلة العزم المستمر للمحرك الحثي ا. ادي الطور من المجموع الجبري لمنحيات مركبتي خاصيتي العزم/السرعة الامامية والعكسية. كما يتضح من الشكل (3) ستكون مركبتي العزم T_f و T_b متساويتين في حالة واحدة فقط، أي عندما تكون السرعة صفر وهو ما يجعل محصلة العزم المستمر للمحرك T صفراً عند السكون. وبذلك لن يتوفر أي عزم صافي لبدء المحرك الحثي احادى الطور وهو ما يجعله غير ذاتي البدء ويتطلب وسيلة مساعدة اضافية لبدء حركته، خلافاً لما عليه الحال في المحرك الحثي ثلاثي الطور.

1.2.8 عزم المحرك الحثي احادي الطور اثناء الدوران.

ويتضح من محصلة العزم/السرعة في الشكل (3) انه اذا ما تم بدء المحرك بأي وسيلة مساعدة في احدى الاتجاهين فسينتج المحرك عزم صافي متواصل في اتجاه الدوران لكون مركبة العزم في ذلك الاتجاه ستكون اكبر كثيراً من المركبة المعاكسة. وستحافظ محصلة العزم على دوران المحرك في الاتجاه الذي بدأ فيه الحركة. وإذا

كانت السرعة التزامنية لمجال ق.د.م الدوارة الامامية n_s ستكون السرعة التزامنية لمجال ق.د.م الدوارة العكسية $-n_s$. وبافتراض بدء دورن المحرك في اتجاه مركبة ق.د.م الامامية بسرعة n سينظر له على انه يدور بسرعة n- بالنسبة لمجال ق.د.م العكسية. ويمكن التعبير عن انزلاق الدوار بالنسبة الى مركبة ق.د.م الدوارة الامامية sf وانزلاقه بالنسبة الى مركبة ق.د.م العكسية $s\,b$ كما يلي:

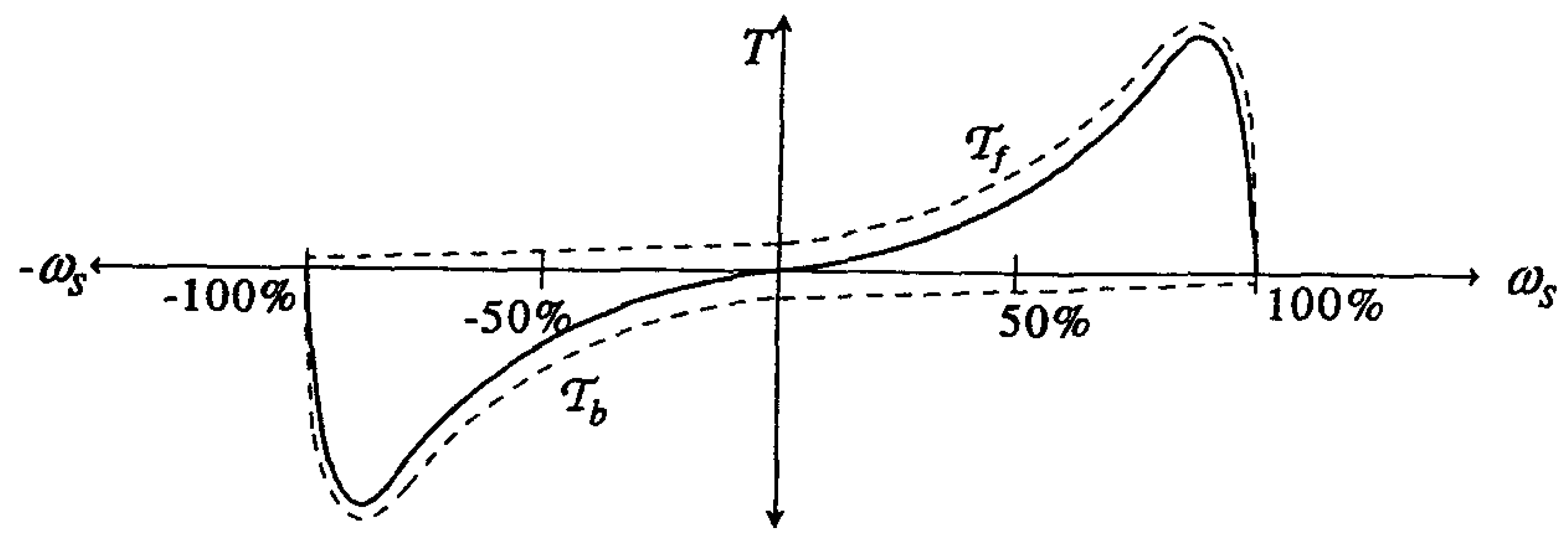
$$s_f = \frac{n_s - n}{n_s} = s \,,\, s_b = \frac{n_s - (-n)}{n_s} = \frac{n_s + n}{n_s} = \frac{2n_s - (n_s - n)}{n_s} = 2 - s \quad (8.4)$$

ولاعتماد ق.د.ك وتيارات الدوار على معامل الانزلاق واختلاف هذه المعاملات بين الدوار وق.د.م الدوارة الامامية والعكسية، ستؤدي مركبتي ق.د.م الساكن الى احتثاث ق.د.ك وتدفق تيارات مختلفة في الدوار بواسطة مركبتي ق.د.م الامامية والعكسية. وعند السكون ستكون معاملات الانزلاق بين الدوار وق.د.م الدوارة الامامية والعكسية $1 = s = sf = sb$ وتكون ق.د.ك الدوار الامامية والعكسية ومن ثم التيارات الناتجة عنها متساوية. وستؤدي تيارات ق.د.ك الدوار الامامية والعكسية الى انشاء مركبتي ق.د.م امامية وعكسية متساوية في المقدار تضاد كل منها ق.د.م الساكن المناظرة لها. وبذلك ستكون محصلة الفيوض الامامية والعكسية للساكن والدوار في الثغرة الهوائية متساوية عند السكون.

وعند دوران دوار المحرك الحثي احادي الطور تكون معاملات الانزلاق $1 > s > 0$ و $s\,b > sf$ وتكون ق.د.ك الدوار العكسية وتيارها اكبر من ق.د.ك الامامية وتيارها، كما يكون معامل قدرة تيار ق.د.ك العكسية اصغر كبر من معامل قدرة تيار ق.د.ك الامامية.

وبذلك تكون ق.د.م الدوار العكسية اكبر من ق.د.م الدوار الامامية اثناء دوران الدوار. ولكون كل من مركبتي ق.د.م الدوار تضاد مركبة ق.د.م الساكن المناظرة المسببة لها، سيؤدي ذلك الى جعل محصلة ق.د.م والفيض الامامية للساكن والدوار اكبر من محصلة ق.د.م والفيض العكسية اثناء دوران المحرك.

ومع كون محصلة الفيض الامامية اكبر من محصلة الفيض العكسية فإن المحصلة الكلية لفيض الثغرة الهوائية ستبقى تقريبياً ثابتة لكون ق.د.ك المنتج التي تحثها المحصلة الكلية ستضل ثابتة، عند اهمال هبوط جهد الصغير في معاوقة الساكن، بسبب ثبوت جهد المصدر. وبثبوت ق.د.ك المصدر يؤدي كبر محصلة الفيض الامامية مقارنة بمحصلة الفيض العكسية اثناء الدوران الى زيادة العزم الامامي وخفض العزم العكسي مقارنة بالعزوم المبذولة بفرض تساوي مركبتي العزوم المبينة في الشكل (3). ولذلك سيكون الشكل الفعلي لمنحنى خاصية العزم/السرعة اثناء دوران المحرك كما هو مبين في الشكل(4).



الشكل(4)خاصية العزم/السرعة للمحرك الحثي احادي الطور مع تغير ق.د.م الامامية والعكسية.

ويجدر بالذكر ان العزم المبين في الشكل (5) يمثل القيم المتوسطة الناتجة عن تفاعل ق.د.م متشابهة الاتجاه للساكن والدوار. وفي المقابل ينتج تفاعل ق.د.م المتضادة الاتجاه للساكن والدوار عزوم نابضة بضعف تردد تيار المصدر. وبالرغم من ان متوسط العزوم النابضة صفراً فهي تتسبب في طنين وتجعل المحركات الحثية احادية الطور اكثر ضوضاءً مقارنة بالمحركات ثلاثية الطور المناظرة. ويمكن الحد من تأثير العزوم النابضة باستخدام مثبتات ووسائد مرنة من المطاط وما شابهه.

2.8. 2. نمذجة المحرك الحثي احادي الطور.

لقد تبين ان تدفق تيار متردد في لفائف الساكن للمحرك الحثي احادي الطور ينتج ق.د.م نابضة يمكن تمثيلها بموجتي ق.د.م دوارة امامية وعكسية تدوران بسرعة التزامن، كما يحددها تردد تيار المصدر وعدد الاقطاب، في اتجاهين متضادين. وستحثث كل مركبة في لفائف الدوار ق.د.ك تمرر تيار يؤدي بدوره الى انتاج ق.د.م دوارة مناظرة للدوار. وسينتج عن تفاعل مركبتي ق.د.م الساكن والدوار وفقاً لنظرية عمل المحرك الحثي عزم دوران مستمر في اتجاه المركبتين. ويمكن الانطلاق من مفاهيم نظرية ق.د.م الدوارة المزدوجة (double revolving theory) هذه لنمذجة وتقييم اداء المحرك الحثي احادي الطور.

وفي حالة السكون تكون مركبتي موجة ق.د.م لفائف الساكن النابضة الامامية والعكسية متساوية في المقدار ومتضادة في الاتجاه تؤدي بدورها الى انتاج لفائف الدوار مركبتي ق.د.م متساويتين ومتضادتين وبما يجعل مركبتي محصلة ق.د.م الثغرة الهوائية الكلية

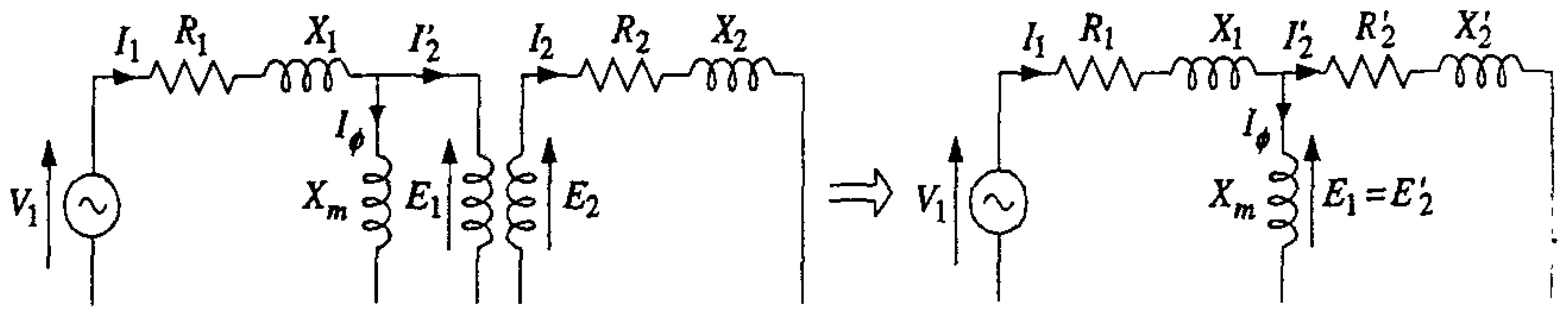
متساوية ومتضادة تنتج عزم نابض غير مستمر. وبذلك يكون تردد تيار العضوين الساكن والدوار متساوياً عند السكون وتكون محد ىلة ق.د.م الثغرة الهوائية نابضة كما في محول القوى.

وعليه يمكن السكون وكما في المحرك الحثي ثلاثي الطور النظر للمحرك الحثي احادي الطور كمحول قوى حيث يمثل الساكن جانب ابتدائي ويمثل الدوار جانب ثانوي مقصور. وإذا كان تردد المصدر الذي يغذي الساكن f_1 وعدد اللفات الفعال للفائف $N_e = N\,k_W$ حيث k_W معامل اللفائف، ومحصلة الفيض الكلية في الثغرة الهوائية Φ يمكن عند السكون التعبير عن ق.د.ك الساكن والدوار وترددهما الزاوي ونسبة عدد ''لفات الفعالة للعضوين كما يلي:

$$E_1 = 4.443\,N_{e1}\Phi f_1 \qquad E_2 = 4.443\,N_{e2}\Phi\, f_1 \qquad (8.5)$$

$$\omega_s = 60\,f_1\,/\,p, \qquad a = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} = \frac{N_{e1}}{N_{e2}} = \frac{E_1}{E_2} \qquad (8.6)$$

وسيتدفق تيار الساكن I_1 في مقاومة اللفائف R_1 ومفاعلة التسرب X_1 ويشمل مركبة الحمل I'_2 لمعادلة ق.د.م تيار الدوار ومركبة الاثارة I_ϕ في مفاعلة المغنطة X_m لإنتاج فيض الثغرة الهوائية مع اهمال فقودات اللب الصغيرة والتي يمكن عند اللزوم اعتبارها مع الفقودات الميكانيكية جزء من الحمل فيما يعرف بالفقودات الدورانية. كما سيتدفق تيار الدوار I_2 في مقاومة اللفائف R_2 ومفاعلة التسرب X_2. وبذلك يمكن عند السكون نمذجة المحرك الحثي احادي الطور بدائرة مكافئة تماماً كما في محول القوى والتي عادةً ما يتم نسبة جميع عناصرها الى جانب الساكن كما في الشكل (5).



شكل (5) الدائرة المكافئة للمحرك الحثي احادي الطور عند السكون.

وعند الدوران وطبقاً لنظرية ق.د.م الدوارة المزدوجة تكون مركبتي ق.د.م الثغرة مختلفتين حيث تكون المركبة التي في اتجاه الدوران اكبر من الاخرى. وبذلك تكون مركبتي ق.د.ك المحثثة في لفائف الدوار مختلفتين ينتجان مركبتي تيار مختلفتين في معاوقتين مختلفتين وينتج عن تفاعلات ق.د.م الدوار الناتجة عنهما مع ق.د.م الساكن المناظرة مركبتي عزم مختلفتين تعطيان محصلة عزم دوران مستمر. وبينما يبقى تردد ق.د.ك الساكن مساوي لتردد المصدر فإن تردد ق.د.ك الدوار سيتغير مع سرعة دورانه. وإذا كانت N_{e2} عدد اللفات الفعال للدوار و Φ_f و Φ_b مركبتي محصلة فيض الثغرة الهوائية الامامية والعكسية ، يمكن التعبير عن تردد ومقدار ق.د.ك الامامية العكسية للدوار f_{2f} و E_{2f} و f_{2b} و E_{2b} كما يلي:

$$f_{2f} = s_f f_1 = s f_1\ , \qquad f_{2b} = s_b f_1 = (2 - s) f_1 \quad (8.7)$$

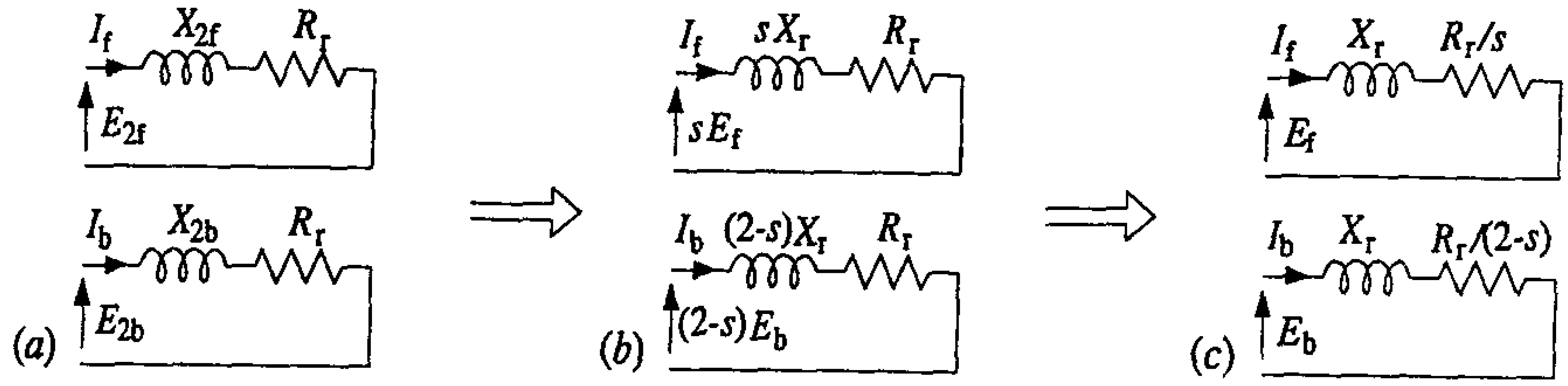
$$E_{2f} = 4.443\ N_{e2} \Phi_f\ f_{2f}\ , \quad E_{2b} = 4.443\ N_{e2} \Phi_b\ f_{2b} \quad (8.8)$$

وسيؤدي اختلاف تردد ق.د.ك الامامية والعكسية الى اختلاف تردد تياراتها ومفاعلاتها حيث تتناسب مركبتي ق.د.ك ومفاعلة التسرب للفائف الدوار مع سرعتهما بالنسبة الى محصلة المجال الدوار في الثغرة. وستكون ق.د.ك والمفاعلة الامامية اكبر ما يمكن عند

السكون لتقل مع زيادة السرعة الى الصفر عند سرعة التزامن، وفي المقابل تكون ق.د.ك والمفاعلة العكسية اقل ما يمكن عند السكون لتصل قيمتها الكبرى عند سرعة التزامن. ولذلك يتطلب تقييم اداء المحرك الحثي احادي الطور مع مراعاة اختلاف المركبتين عند الدوران تمثيل لفائف الدوار بدائرتين مكافئتين تمثلان ق.د.ك الامامية والعكسية كما في الشكل (6a). وستشمل كل من الدائرة المكافئة الامامية والعكسية للدوار نصف مقاومة لفائفه R_2 ونصف محاثة تسربه L_2 حيث:

$$X_{2f}=2\pi f_{2f}L_2, \qquad X_{2b}=2\pi f_{2b}L_2 \quad (8.9)$$

وكما في المحرك الحثي ثلاثي الطور يمكن تبسيط دائرتي الدوار الامامية والعكسية بالتعبير عن ق.د.ك ومفاعلة التسرب الفعلية للدائرتين عند ترددها الفعلي بدلالة قيمها المحددة عند السكون كما في الشكل (6b) ووفقاً للعلاقات التالية:



شكل (6) الدوائر المكافئة لدوار المحرك الحثي احادي الطور.

$$s_f=s_b=s,\ f_{2f}=f_{2b}=f_2=f_1 \text{ عند السكون} \quad (8.10)$$

$$E_f=4.443\,N_{e2}\Phi_f f_1, E_b=4.443\,N_{e2}\Phi_b f_1, X_r=2\pi f_1 L_2$$

عند السكون (8.11)

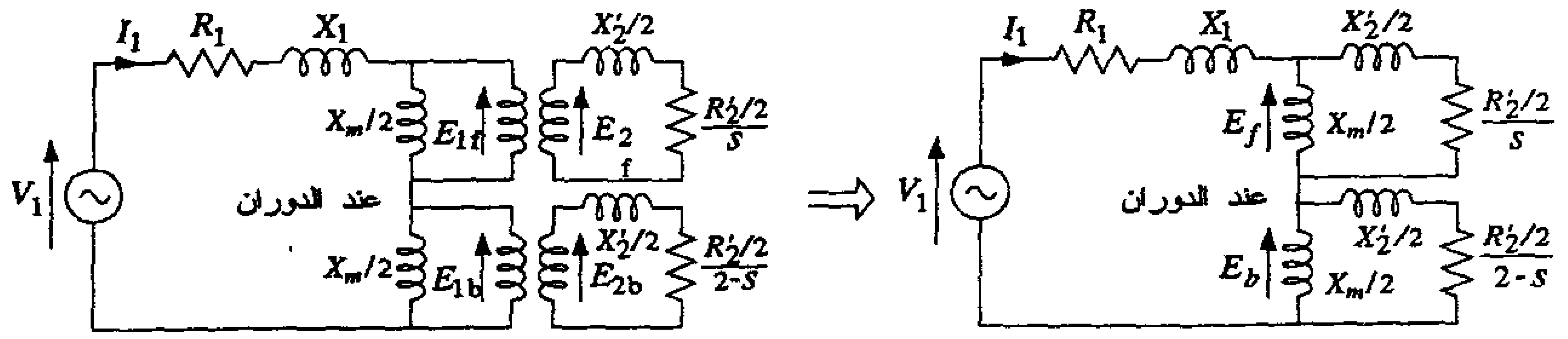
$E_{2f} = 4.443 N_{e2} \Phi_f \, s f_1 = s E_f$, $X_{2f} = 2\pi s f_1 L_2 = s X_r$

عند الدوران (8.12)

$E_{2b} = 4.443 N_{e2} \Phi_b (2-s) f_1 = (2-s) E_b$, $X_{2b} = 2\pi (2-s)$

$f_1 L_2 = (2-s) X_r$ عند الدوران (8.13)

ولتغير ق.د.ك وتردد الدائرتين مع السرعة وعدم امكانية نسبة معاملاتها وعناصرها الى دائرة الساكن لاختلاف التردد، يمكن اعادة تمثيل دائرتي الدوار بدائرتين مكافئتين ذات ق.د.ك ومفاعلة ثابتة عند تردد الساكن ومقاومة متغيرة مع معامل الانزلاق (السرعة) بقسمة طرفي معادلات جهدها $(E=IZ)$ على معامل الانزلاق كما هو مبين في الشكل (6c). ومن ثم يمكن نسبة معاملات دائرتي الدوار وعناصرها الى دائرة الساكن بضرب ق.د.ك في نسبة عدد اللفات وضرب المعاوقات في مربع نسبة عدد اللفات والحصول على الدائرة المكافئة للمحرك الحثي احادي الطور منسوبة للساكن كما في الشكل (7):



شكل (7) الدائرة المكافئة للمحرك الحثي احادي الطور.

3.2.8. اختبارات المحرك الحثي احادي الطور.

يعتمد اداء المحرك الحثي احادي على معاملات الدائرة المكافئة التي يمكن قياس بعضها بشكل مباشر بالقياسات البسيطة التي تجرى عند اطراف الآلة مثل قياس مقاومة لفائف الساكن ببساطة باستخدام مصدر تيار مستمر عند درجة حرارة مناسبة، ويتم تعيين

البعض الآخر على سبيل التقريب باجراء بعض الاختبارات القياسية. ويمكن الحصول على معاملات الدائرة المكافئة للمحرك الحثي احادي الطور المنسوبة للساكن المبينة في الشكل (7) بإجراء اختباري اللاحمل والدوار المعاق كما في المحرك الحثي ثلاثي الطور مع مراعاة فصل لفائف البدء المساعدة في الاختبارين.

وفي اختبار الدوار المعاق حيث الانزلاق $s=1$ تكون الفقودات الدورانية الميكانيكية صفراً والحديدية صغيرة ومهملة وستمثل القدرة المسحوبة في هذه الحالة فقد النحاس P_c. ويمكن اختصار الدائرة المكافئة المنسوبة للساكن في حالة السكون والمبينة في الشكل (5) كما في الشكل (8ب) بحذف فرع X_m لصغر تياره مقارنة بتيار الدوار واعتبار $X'_2 \approx X_1$. فإذا كان الجهد والتيار والقدرة المقاسة عند اطراف الساكن V_{br} و I_{br} و P_{br}، وثم قياس مقاومة الساكن مباشرةً يمكن ايجاد معاوقات الساكن والدوار كما في المعادلات التالية مع ملاحظة تعديل المعاملات للتردد الاعتيادي اذا كان تردد الاختبار مختلفاً عنه.

$$Z_{br} = V_{br}/I_{br} = R_{br} + jX_{br} \qquad (8.14)$$

$$R_{br} = P_{br}/I_{br}^2 = R'_2 + R_1 \qquad (8.15)$$

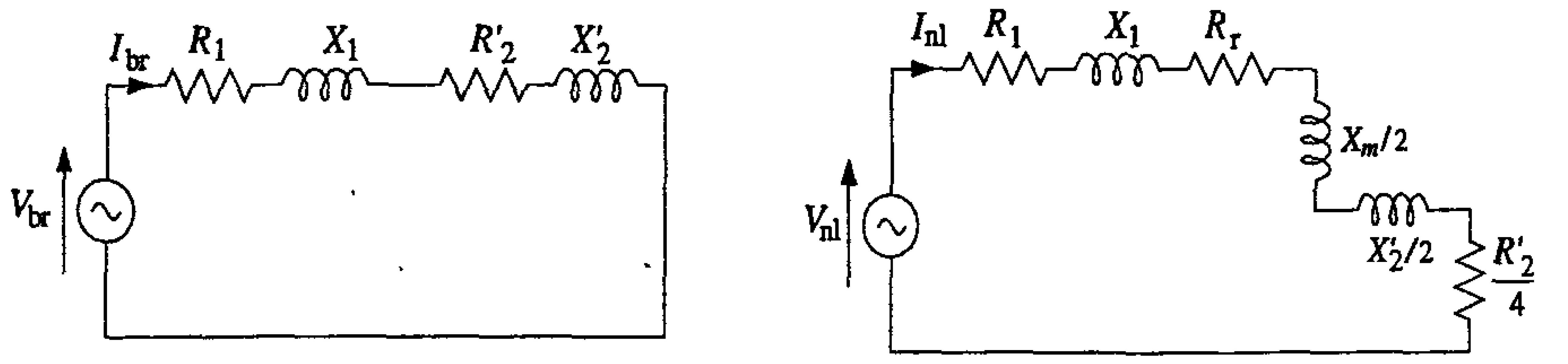
$$X_{br} = \sqrt{(Z_{br}^2 - R_{br}^2)} = X'_2 + X_1 \qquad (8.16)$$

$$X'_2 \approx X_1 \approx X_{br}/2 \qquad (8.17)$$

$$R'_2 = R_{br} - R_1 \qquad (8.18)$$

$$P_c = P_{br} \qquad (8.19)$$

وفي اختبار اللاحمل يكون الانزلاق $s_{nl} \rightarrow 0$ صغير جداً وتكون مقاومة الدوار الامامية $0.5R'_2/s_{nl} \rightarrow \infty$ وبالتالي يكون تيار دائرة الدوار الامامية صغير جداً ويمكن حذف مفاعلة دائرة الدوار الامامية لصغر تيارها. وفي المقابل تكون مقاومة الدوار العكسية $0.5R'_2/(2-s_{nl}) \rightarrow 0.25R'_2$ صغيرة جداً مقارنة بمفاعلة المغنطة $0.5X_m$ بحيث يمكن اهمال الاخيرة لصغر تيارها. ووفقاً للدائرة المكافئة المنسوبة للساكن والمبينة في الشكل (7) ستمثل القدرة المسحوبة اثناء الدوران الفقد في مقاومة الساكن ومقاومة الدوار العكسية اضافةً الى الفقودات الدورانية P_r التي يمكن اخذها في الحسبان بمقاومة مكافئة R_r. وبذلك يمكن في اختبار اللاحمل اختصار الدائرة المكافئة المنسوبة للساكن والمبينة في الشكل (7) كما في الشكل (8b). وإذا كان الجهد والتيار والقدرة الداخلة عند اطراف الساكن V_{nl} و I_{nl} و P_{nl}، يمكن حساب كل من الفقودات الدوارنية ومفاعلة المغنطة كما يلي:



دائرة اختبار الاعاقة (a)   دائرة اختبار اللاحمل (b)

شكل (8) دوائر اختبار اللاحمل والإعاقة للمحرك الحثي احادي الطور.

$$Z_{nl} = V_{nl}/I_{nl} = R_{nl} + jX_{nl} \qquad (8.20)$$

$$R_{nl} = P_{nl}/I_{nl}^2 = R_1 + 0.25R'_2 + R_r \qquad (8.21)$$

$$X_{nl} = \sqrt{(Z_{nl}^2 - R_{nl}^2)} = X_1 + 0.5(X'_2+X_m) \quad (8.22)$$

$$P_r = I_{nl}^2R_r= P_{nl} - I_{nl}^2(R_1 + 0.25R'_2) \quad (8.23)$$

$$X_m = 2(X_{nl} - X_1 - 0.5X'_2) \quad (8.24)$$

2.8 .4. تقييم اداء المحرك الحثي احادي الطور.

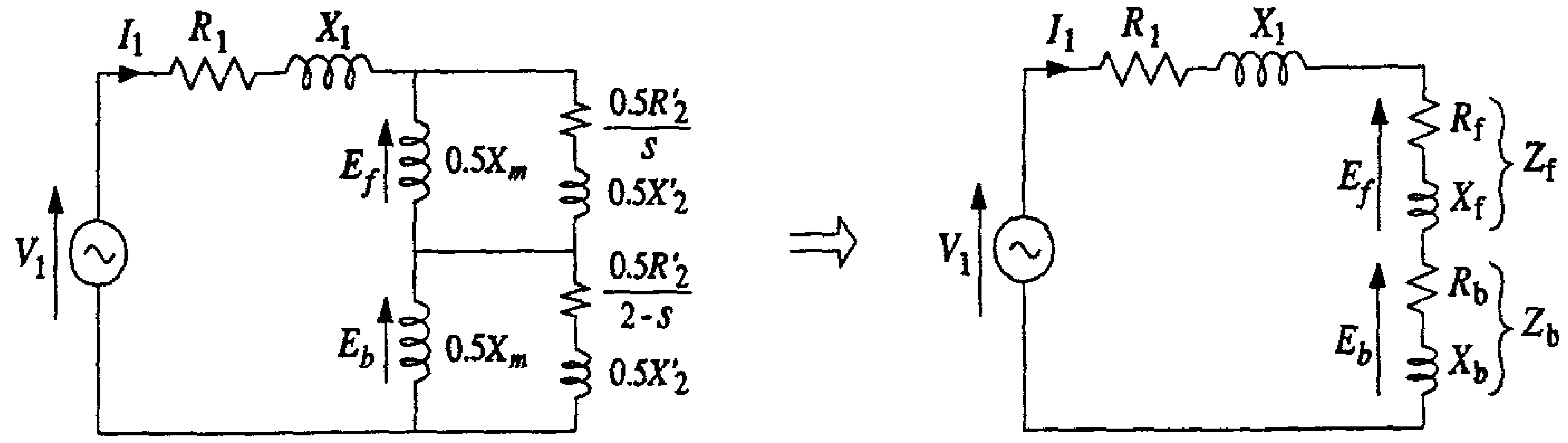
تؤدي ق.د.م الثغرة الهوائية عند دوران المحرك الحثي احادي الطور في اتجاه امامي بانزلاق s الى احتثاث ق.د.ك امامية Ef في الدوار وتدفق تيار If بتردد $sf1$ يمكن تمثيل تأثيرها في الدائرة المكافئة منسوبة للساكن بتيار $I'f$ في معاوقة $Z'2f$. وبالمثل ستؤدي ق.د.م الثغرة الى احتثاث ق.د.ك، عكسية Eb وتدفق تيار Ib بتردد $(2-s)f1$ يمكن تمثيل تأثيرها في الدائرة المكافئة بتيار $I'b$ في معاوقة $Z'2b$ حيث $f1$ تردد تيار الساكن. ولتحليل ق.د.م الساكن النابضة الى مركبتين امامية وعكسية متساوية المقدار، ستشمل كل من $Z'2f$ و $Z'2b$ نصف معاوقة الدوار مع التعديل الذي يفرضه تغير واختلاف التردد. وكما يتضح من الدائرة المكافئة المبينة في الشكل (7) يمكن التعبير عن معاوقتي الدوار الامامية والعكسية $Z'2f$ و $Z'2b$ منسوبة للساكن كما يلي:

$$Z'_{2f} = 0.5R'_2 /s + j\,0.5X'_2 \quad (8.25)$$

$$Z'_{2b} = 0.5R'_2 /(2-s) + j\,0.5X'_2 \quad (8.26)$$

ويتطلب تقييم اداء المحرك الحثي احادي الطور اساساً اجراء الحسابات اللازمة لإيجاد كل من تيار الساكن المسحوب من المصدر والقدرة الداخلة والعزم المبذول على الحمولة وكفاءة المحرك عند السرعات (معاملات الانزلاق) والأحمال المختلفة بمعرفة جهد المصدر

ومعاوقات المحرك. ولتسهيل الحسابات المطلوبة يمكن تبسيط الدائرة المكافئة المنسوبة للساكن كما في الشكل (9) بتمثيل كل من دائرتي الدوار الامامية والعكسية بمعاوقتين Z_f و Z_b على التوالي وكما يلي:



شكل (9) تبسيط الدائرة المكافئة للمحرك الحثي احادي الطور.

$$Z_f = R_f + jX_f = Z'_{2f} // j0.5X_m = \frac{j0.5X_m(R'_2/s + jX'_2)}{R'_2/s + j(X_m + X'_2)} \quad (8.27)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = Z'_{2b} // j0.5X_m = \frac{j0.5X_m[R'_2/(2-s) + jX'_2]}{R'_2/(2-s) + j(X_m + X'_2)} \quad (8.28)$$

ويمكن ايجاد محصلة العزم الكلية للمحرك الحثي احادي الطور بالفارق بين مركبة العزم الامامية الناتجة عن تفاعل ق.د.م الامامية، ومركبة العزم العكسية الناتجة عن تفاعل ق.د.م العكسية للساكن والدوار باعتبار تفاعل ق.د.م المتضادة ينتج عزوم نابضة متوسطها صفر. ويمكن حساب مركبتي العزم الامامية والعكسية كل على حدى بتطبيق ذات العلاقات المستخدمة في المحرك الحثي ثلاثي الطور بدلالة مركبتي قدرة الثغرة الهوائية الناتجة عن المجالات الامامية والعكسية كما يلي:

$$P_{ef} = I_1^2 R_f, \qquad T_{mf} = P_{ef} / \omega_s \qquad (8.29)$$

$$P_{eb} = I_1^2 R_b , \qquad T_{mb} = P_{eb} / \omega_s \qquad (8.30)$$

$$T_{mt} = T_{mf} - T_{mb} = I_1^2 (R_f - R_b) / \omega_s \qquad (8.31)$$

كما يمكن حساب القدرة الميكانيكية الكلية وصافي القدرة الخارجة وقدرة الثغرة الهوائية من المعادلات (29) الى (31) كما يلي:

$$P_{mt} = \omega T_m = (1-s)\omega_s T_m = (1-s)(P_{ef} - P_{eb}) = (1-s)(R_f - R_b) I_1^2 \qquad (8.32)$$

$$P_m = P_{mt} - P_r , \; P_{et} = P_{ef} + P_{eb} = (R_f + R_b) I_1^2 \qquad (8.33)$$

ويمكن ايجاد فقودات النحاس بجمع الفقد في دائرتي الدوار الامامية والعكسية كما في المحرك الحثي ثلاثي الطور وكما يلي:

$$P_{cf} = s_f P_{ef} = sP_{ef} , \quad P_{cb} = s_b P_{eb} = (2 - s) P_{eb} \qquad (8.34)$$

$$P_{c2} = P_{cf} + P_{cb} = sP_{ef} + (2 - s) P_{eb} \qquad (8.35)$$

5.2.8. بدء المحركات الحثية احادية الطور.

لقد تبين فيما سبق ان مركبتي العزم الامامية والعكسية في المحرك الحثي احادي الطور تكون متساوية ومتضادة عند السكون لتكون محصلتها صفراً ولا توفر عزم بدء مستمر وكما يتضح من خاصيتي العزم/السرعة الامامية والعكسية في الشكل (3). ولذلك يعد المحرك الحثي احادى الطور غير ذاتي البدء حيث لا يمكن للفائف الطور في الساكن بدء حركة المحرك بمفردها حيث يتطلب ذلك وسيلة اضافية تستخدم لبدء الحركة. وبمجرد بدء الحركة بأي وسيلة تصبح

مركبة العزم الامامية اكبر من العكسية مما يوفر صافي عزم لاستمرار الدوران ويسمح بفصل وسيلة البدء لتحافظ لفائف الطور على الدوران.

ومن ابسط وسائل بدء حركة المحرك الحثي احادي الطور استخدام لفائف احادية اضافية في الساكن تسمى باللفائف المساعدة (auxiliary winding) او لفائف البدء (starting winding) الى جانب لفائف الطور الاصلية والتي تسمى باللفائف الرئيسية (main winding) او لفائف العمل (running winding) وذلك ليتم بدء المحرك الحثي احادي الطور كمحرك ثنائي الطور. وبعد بدء وانطلاق المحرك في العمل ستكفي محصلة عزم اللفائف الرئيسية للحفاظ على دوران المحرك ويمكن الاستغناء عن اللفائف المساعدة عند ارتفاع سرعة المحرك. وعملياً غالباً ما يتم توصيل مفتاح طرد مركزي (centrifugal switch) مع اللفائف المساعدة يكون موصلاً عند السكون ولكنه يفصل هذه اللفائف تلقائياً عند حوالى 75% من السرعة التزامنية.

ويحدد موضع اللفائف المساعدة في الساكن ليكون محور فيضها متقدم $\pi/2$ عن محور اللفائف الرئيسية، كما يتم تعديل معاوقات اللفائف المساعدة بما يجعل تيارها متقدم طورياً على تيار اللفائف الرئيسية بما يقترب من $\pi/2$. وعندها سينظر للمحرك احادي الطور كمحرك ثنائي الطور غير متزن تتوفر فيه ق.د.م دوارة وعزم بدء ذاتياً كأي محرك متعدد الاطوار. واذا كان عدد لفات لفائف العمل الرئيسية Nm وتيارها im وعدد لفات اللفائف البدء المساعدة Na وتيارها ia يتقدم عن تيار اللفائف الرئيسية بزاوية α، يمكن التعبير

عن ق.د.م الدوارة للساكن عند نقطة في الثغرة الهوائية تبعد θ عن محور اللفائف الرئيسية (محور الاسناد) و $(\theta + \pi/2)$ عن محور اللفائف المساعدة (المتقدم $\pi/2$ عن محور اللفائف الرئيسية) كما يلي:

$$i_m = \hat{I}_m \cos \omega t , \qquad i_a = \hat{I}_a \cos(\omega t+\alpha) \quad (8.36)$$

$$F_m=N_m \; i_m \; \cos\theta \;, F_a=N_a i_a \cos(\theta+\pi/2)=- \; N_a \; i_a \; \sin\theta \quad (8.37)$$

$$F = F_m + F_a = N_m \hat{I}_m \cos \omega t \cos \theta - N_a \hat{I}_a \cos(\omega t+\alpha) \sin \theta$$

$$=N_m \hat{I}_m \cos\omega t \cos\theta - N_a \hat{I}_a [\cos\omega t \cos\alpha - \sin\omega t \sin\alpha)]\sin\theta$$

$$= N_m \hat{I}_m \cos\omega t \cos\theta - N_a \hat{I}_a [\cos\alpha \cos\omega t \sin\theta - \sin\alpha \sin\omega t \sin\theta)]$$

$$= \frac{1}{2} N_m \hat{I}_m [\cos(\omega t+\theta)+\cos(\omega t-\theta)]$$

$$-\frac{1}{2} N_a \hat{I}_a [\sin(\omega t+\theta) - \sin(\omega t-\theta)] \cos\alpha$$

$$-\frac{1}{2} N_a \hat{I}_a [\cos(\omega t+\theta)- \cos(\omega t-\theta)] \sin\alpha \quad (8.38)$$

ويمكن تحليل ق.د.م الساكن الرئيسية والمساعدة $\mathcal{F}$ في المعادلة (8.38) الى مركبة ق.د.م امامية $\mathcal{F}f$ تضم حدود $(\omega t - \theta)\cos$ و $\sin(\omega t - \theta$ ومركبة ق.د.م عكسية $\mathcal{F}b$ تضم حدود $(\omega t+\theta)\cos$ و $\sin(\omega t+\theta)$) وذلك كما يلي:

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}f + \mathcal{F}b \quad (8.39)$$

$$\mathcal{F}f=\frac{1}{2}[N_m \hat{I}_m + N_a \hat{I}_a \sin\alpha]\cos(\omega t-\theta) - \frac{1}{2}[N_a \hat{I}_a \cos\alpha]\sin(\omega t-\theta) \quad (8.40)$$

$$\mathcal{F}b = \frac{1}{2}[N_m \hat{I}_m - \; N_a \hat{I}_a \sin \alpha] \cos(\omega t+\theta) - \frac{1}{2}[N_a \hat{I}_a \cos \alpha] \sin(\omega t+\theta) \quad (8.41)$$

ويمكن من المعادلة (8.39) ايجاد مقدار وزاوية تيار لفائف البدء المساعدة والمطلوبين للحصول على نظام متزن ثنائي الطور مماثل للفائف المحرك الحثي ثنائي الطور التي تنتج ق.د.م دوارة في الاتجاه الامامي فقط. ويتضح من المعادلة (8.41) ان الغاء مركبة ق.د.م العكسية يتطلب ان تكون الحدود بين الاقواس المربعة في المعادلة اصفارا الامر الذي يستلزم ما يلي:

$$N_m \hat{I}_m = N_a \hat{I}_a \,, \quad \alpha = \pi/2 \qquad (8.42)$$

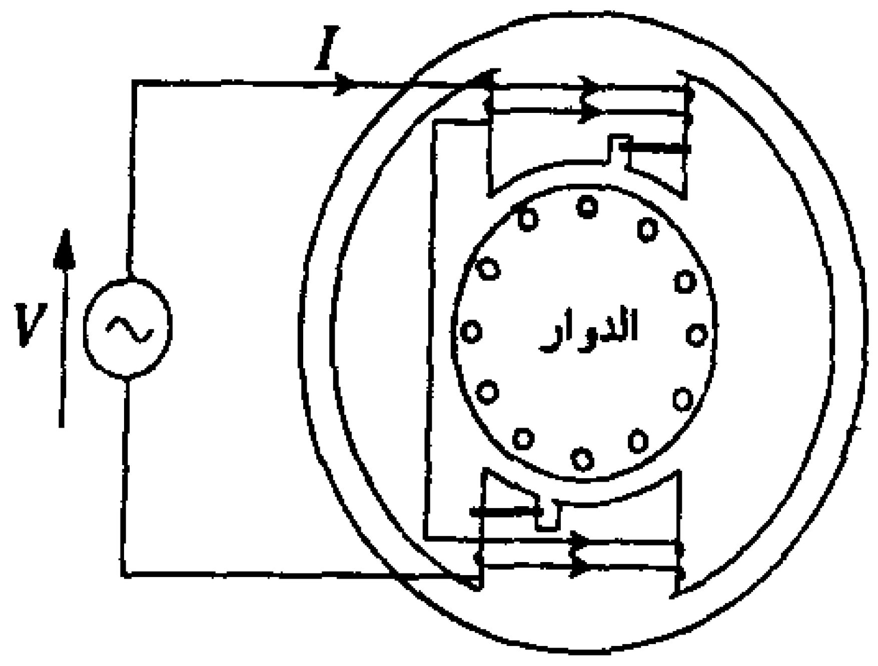
وبذلك يتطلب التصميم الامثل للفائف المساعدة ان يعطي تيارها ق.د.م عظمى تساوي ق.د.م العظمى للفائف الرئيسية، وان يكون تيارها مختلفاً طورياً بزاوية $90°$ عن تيار اللفائف الرئيسية وعندها ستختصر المعادلات (8.39) الى (8.41) كما يلي:

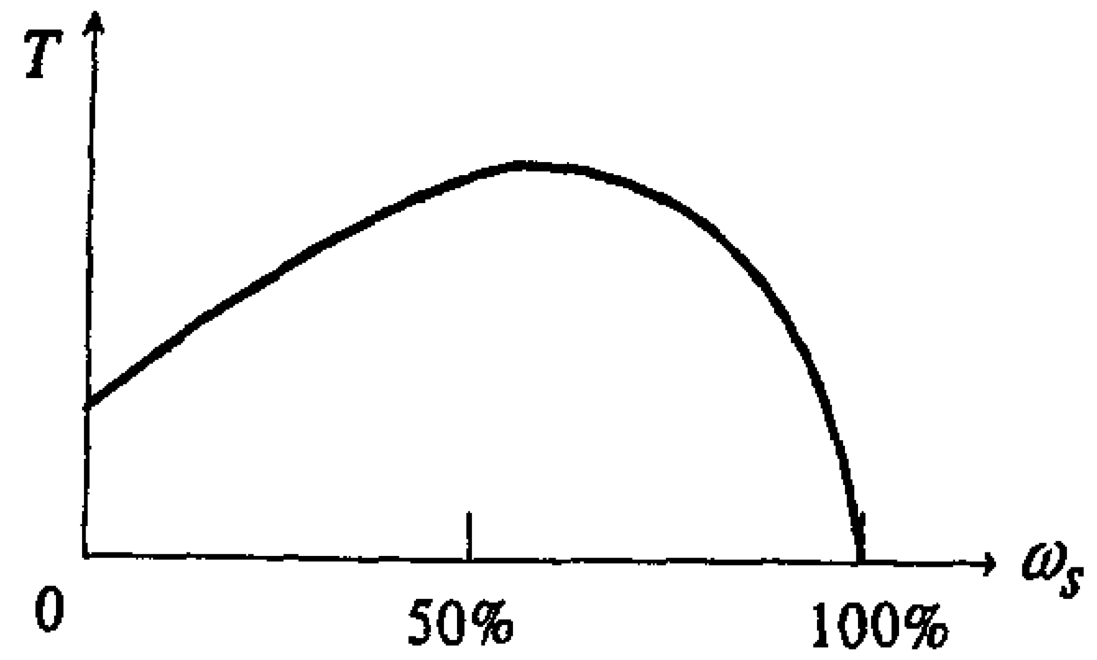
$$\mathcal{F}_b = 0, \qquad \mathcal{F} = \mathcal{F}_f = N_m \hat{I}_m \cos(\omega t - \theta) \quad (8.43)$$

8.2 .6. تصنيف المحركات الحثية احادية الطور.

تصنف المحركات الحثية احادية الطور وفقاً لآلية وترتيبات بدء حركتها حيث تعرف بأسماء تصف الطريقة او الوسيلة المستخدمة فيها للحصول على ق.د.م دوارة. وقد يتم ذلك بتعديل الدائرة المغناطيسية للمحرك والاستغناء بذلك عن الحاجة للفائف مساعدة كما في محركات القطب المحجوب، او بإحداث ازاحة طورية بين تيار اللفائف المساعدة وتيار اللفائف الرئيسية لتشمل محركات الطور المجزأ او البدء بالمقاومة ومحركات المكثفات التي تستخدم مكثف للبدء او للعمل او للبدء والعمل. ويمكن وصف هذه الانواع وآلية عمل طرق ووسائل بدئها باختصار كما يلي:

1 – محركـات القطـب المحجـوب (shaded-pole): وهـي لا تضـم لفائف مساعدة كما في المحركات الحثي احادية الطور الاخرى، ولكنها تستخدم ساكن ذو اقطاب بارزة يتم لف اللفائف الرئيسية احادية الطور حولها. ويتم شق كل قطب عند وجهه المقابل للدوار لتجزئته الى جزئين يتم حجب احداها (وعادةً ما يكون الاصغر) بحلقة نحاسية سميكة مقصورة وكما هو مبين في الشكل (10). ونتيجة لذلك سيؤدي التيار المتدفق في الحلقة النحاسية المقصورة بسبب ق.د.ك المحتثة فيها الى جعل الفيض المار في الجزء المحجوب من القطب متأخراً طورياً عن الفيض المار في الجزء غير المحجوب حيث يصل فيض الجزء المحجوب قيمته العظمى متأخراً عن فيض الجزء غير المحجوب من القطب.



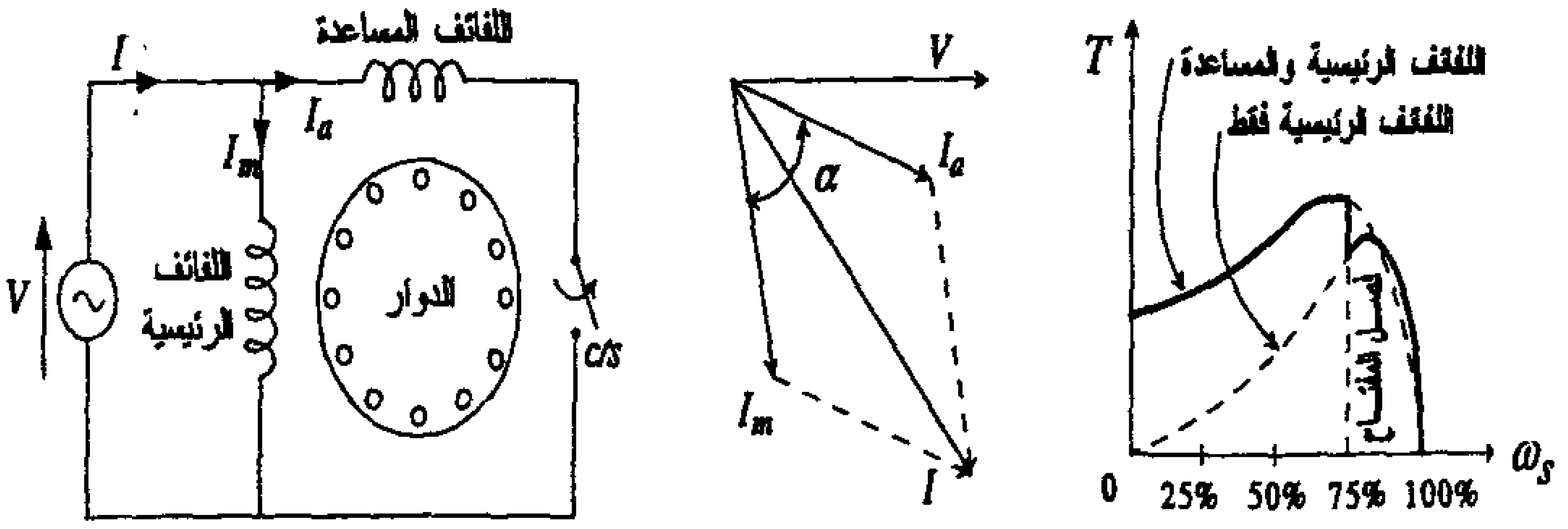


شكل (10) المحرك الحثي احادي الطور ذو القطب المحجوب.

ويكافئ تأثير حجب جزء من القطب الى انحراف محور فيض الجزء غير المحجوب ليتقدم طورياً على محور فيض الجزء المحجوب بحيث يمكن النظر الي فيوض جزئي وجه القطب وكأنها تمثل فيض مركبة ق.د.م امامية عبر الجزء غير المحجوب، وفيض مركبة ق.د.م عكسية عبر الجزء المحجوب. وستمثل محصلة المركبتين ق.د.م دوارة تدور في الاتجاه من الجزء غير المحجوب الى الجزء المحجوب. ولكون محصلة ق.د.م الدوارة ستكون موجود في جميع الاحوال فهي ستوفر

عـزم بـدء بسـيط للمحـرك انطلاقـاً مـن السـكون. ويبين الشـكل (10) خاصية العزم/السرعة للمحرك حيث يتضح ان عـزم البـدء صغير مقارنـة بعزم الانطلاق. وتعد محركات القطب المحجوب الاقل تكلفة من بين المحركـات الصـغيرة ولكـن انخفـاض كفاءتها يقيـد اسـتخدامها علـى مدى قدرات لا تتجاوز 5% من الحصان في العادة.

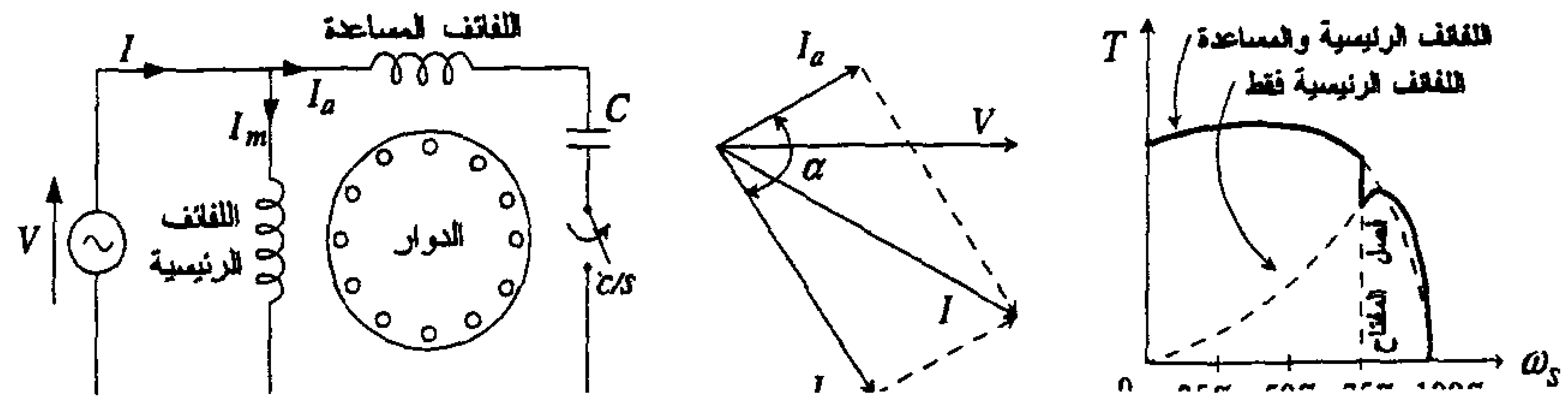
2 – محركــات الطـور المجـزأ (split-phase): ويسـتخدم في هـذه المحركـات التـي تعـرف كـذلك بمحركـات البـدء بالمقاومـة لفـائف مساعدة يتم ازاحة تيارهـا طوريـاً عـن تيـار اللفـائف الرئيسية بجعل زاويـة معاوقـة اللفـائف المسـاعدة اقـل مـن زاويـة معاوقـة اللفـائف الرئيسـية. ويـتم ذلـك بتصـميم اللفـائف المسـاعدة لتكـون نسـبة مقاومتهـا الى معاوقتهـا اكـبر مـن نظيرتهـا للفـائف الرئيسية حيـث يتطلب ذلك استخدام موصلات ذات مساحة مقطع اقل وعدد لفـات اقل في اللفائف المساعدة مقارنةً باللفائف الرئيسية. ومع انه قد يبـدو ان هذا سيعرض اللفائف المساعدة للتلف سريعاً ، الا انـه يعـد مقبـولاً عمليـاً لأن هـذه اللفـائف لا تسـتخدم الا لفـترة البـدء القصـيرة حيـث يقـوم مفتـاح الطـرد المركـزي c/s بفصـلها عنـد حـوالى ثلاثـة اربـاع السـرعة التزامنية.



شكل (11) المحرك الحثي احادي الطور ذو الطور المجزأ.

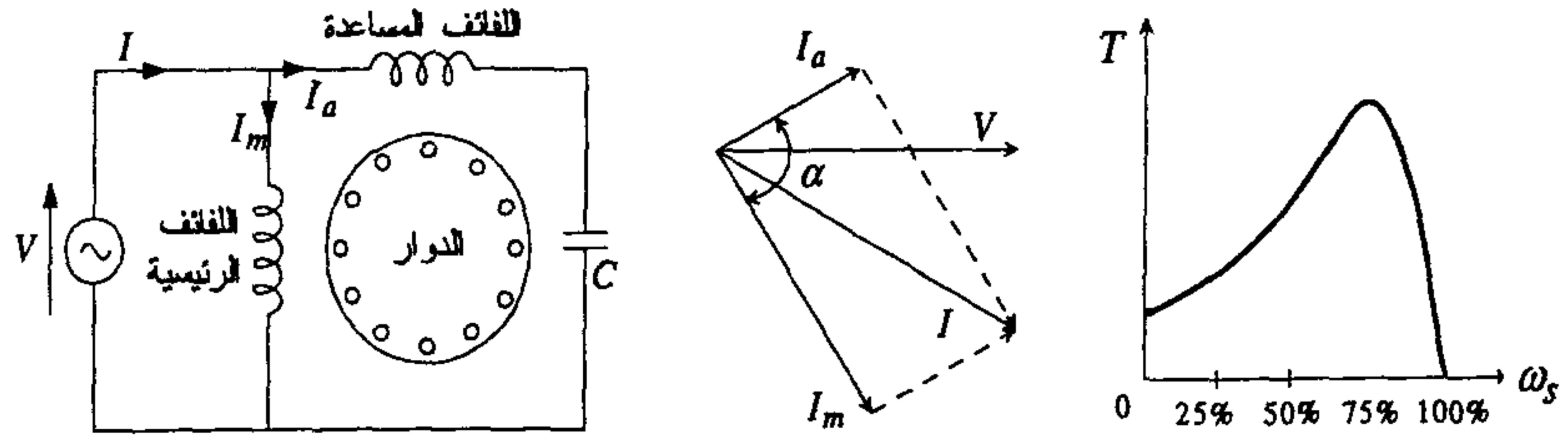
ويبين الشكل (11) الدائرة المكافئة للمحرك الحثي مجزأ الطور والعلاقة الطورية بين تيارات لفائفه وخاصية العزم/السرعة للمحرك حيث يتضح ان عزم بدء المحرك منخفضاً الى حد ما. ولكون عزم البدء يعتمد على مقدار تيارات اللفائف والازاحة الطورية بينها، يمكن زيادة عزم البدء بإدخال مقاومة خارجية اضافية على التوالي مع اللفائف المساعدة الامر الذي يبرر اقتصادياً بكون هذه اللفائف لا تستخدم الا لفترة البدء القصيرة.

3 – المحركات البادئة بالمكثف (capacitor-start): ويتم في هذه المحركات عند البدء توصيل مكثف مناسبة مع دائرة اللفائف المساعدة لتصبح دائرتها ذات معاوقة سعوية وتيار متقدم طورياً مقارنة بالتيار المتأخر لدائرة اللفائف الرئيسية ذات المعاوقة الحثية وبما يجعل المحرك يعمل كمحرك ثنائي الطور غير متزن ذو ق.د.م دوارة تنتج عزم بدء ذاتي. وسيزيد المكثف قليلاً من تكلفة المحرك مع امكانية استخدام مكثف تيار متردد كهروكيميائي (electrolytic) رخيص لكونه لن يستخدم الا لفترة البدء القصيرة. ويمكن الحصول على عزم بدء كافي باستخدام مكثف مناسب. وعلى سبيل المثال يستخدم مكثف متسعته حوالى 300 µf لبدء محرك نصف حصان. ويبين الشكل (12) الدائرة المكافئة للمحرك البدء بالمكثف والعلاقة الطورية بين تياراته وخاصية العزم/السرعة للمحرك حيث يتضح ان عزم بدء المحرك يمكن ان يكون كبيراً جداً.



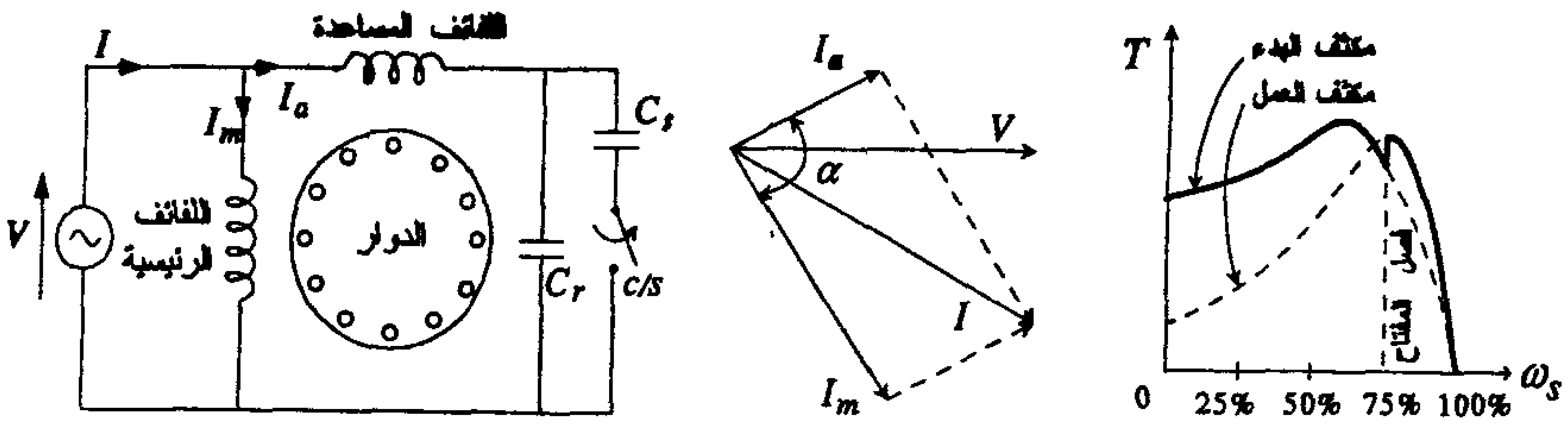
شكل (12) المحرك الحثي احادي الطور البادئ بالمكثف.

4 – المحركات العاملة بالمكثف (capacitor-run): ويتم فيها توصيل مكثف بشكل دائم مع اللفائف المساعدة التي تبقى متصلة اثناء العمل. وسيكون تيار اللفائف المساعدة متقدماً عن الجهد ويبتعد بإزاحة كبيرة عن تيار اللفائف الرئيسية المتأخر. ويمكن تصميم اللفائف والمكثف ليعمل المحرك تماماً كمحرك ثنائي الطور متزن ولكل مستويات الحمل. ويؤدي الاستغناء عن مفتاح الطرد المركزي الى تبسيط بنية المحرك وخفض تكلفته، كما يؤدي الغاء ق.د.م العكسية الى رفع الكفاءة. وسيحسن المكثف من معامل القدرة ويحد من ضجيج المحرك لإلغائه نبض العزم. وسيكون عزم البدء اقل لكون المكثف يجب ان يوفق بين متطلبات البدء والعمل وهو عادةً ما يكون من النوع الورقي المشبع بالزيت وفي حدود μf 20-50. ويبين الشكل (13) الدائرة المكافئة للمحرك العمل بالمكثف ومخططها الطوري وخاصية العزم/السرعة للمحرك.



شكل (13) المحرك الحثي احادي الطور العامل بالمكثف.

5 – المحركات البادئة والعاملة بالمكثف (capacitor-start capacitor-run): ويستخدم في هذه المحركات مكثف البدء وآخر للعمل وبما يحقق الخصائص المثلى للبدء والعمل. وعادةً ما يكون مكثف البدء من نوع الكهروكيميائي وذو متسعة اكبر للحصول عزم بدء اكبر، ويكون مكثف العمل من نوع الورق المشبع بالزيت وذو متسعة اقل للحصول على خصائص عمل اكثر نعومة. وعلى سبيل المثال يستخدم مكثف بدء 300 μf و مكثف عمل 40 μf لمحرك نصف حصان. ويبين الشكل (14) الدائرة المكافئة لمحرك البدء والعمل بالمكثف ومخططها الطوري وخاصية العزم/السرعة للمحرك.



شكل (14) المحرك الحثي احادي الطور البادئ والعامل بالمكثف.

2.8 .7.الدائرة المكافئة لمحركات المكثف الحثية احادية الطور.

يوجد وكما تم بيانه فيما سبق ثلاثة انواع لمحركات المكثف الحثية احادية الطور وهي المحرك البادئ بالمكثف والمحرك العامل بالمكثف والمحرك البادئ والعامل بالمكثف. ويميز النوعين الاخيرين ان اللفائف المساعدة ومعها مكثف العمل المتصل بها على التوالي تبقى متصلة وعاملة طوال عمل المحرك. وسيعمل المحرك العامل بالمكثف كمحرك ثنائي الطور ويمكن بناء نموذج دائرته المكافئة وتقييم اداءه استناداً الى نظرية ق.د.م الدوارة المزدوجة وذلك بتحليل فيض كل من

اللفائف الرئيسية واللفائف المساعدة الى مركبات امامية وعكسية ينتج كل منها ق.د.ك حثية في كل من اللفائف.

وستؤدي ق.د.م الناتجة عن تيار اللفائف الرئيسية I_m الى انشاء فيض Φ_m يمكن تحليله الى مركبتين امامية وعكسية Φ_{mf} وΦ_{mb} ، كما ستؤدي ق.د.م الناتجة عن تيار اللفائف المساعدة I_a الى انشاء فيض Φ_a يمكن تحليله الى مركبتين امامية وعكسية Φ_{af} وΦ_{ab} وكما هو مبين في الشكل (15a). ويمكن الوصول الى الدائرة المكافئة لكل من اللفائف الرئيسية والمساعدة انطلاقاً من الشكل (9) مع اضافة مركبات ق.د.ك المحتثة في كل منها بسبب مركبات فيض اللفائف الأخرى والتي يحدد مقدارها نسبة عدد لفات اللفائف ويحدد اتجاهها وإزاحتها اتجاه وإزاحة مركبات الفيض الحاثة لها كما هو مبين في الشكل (15a).

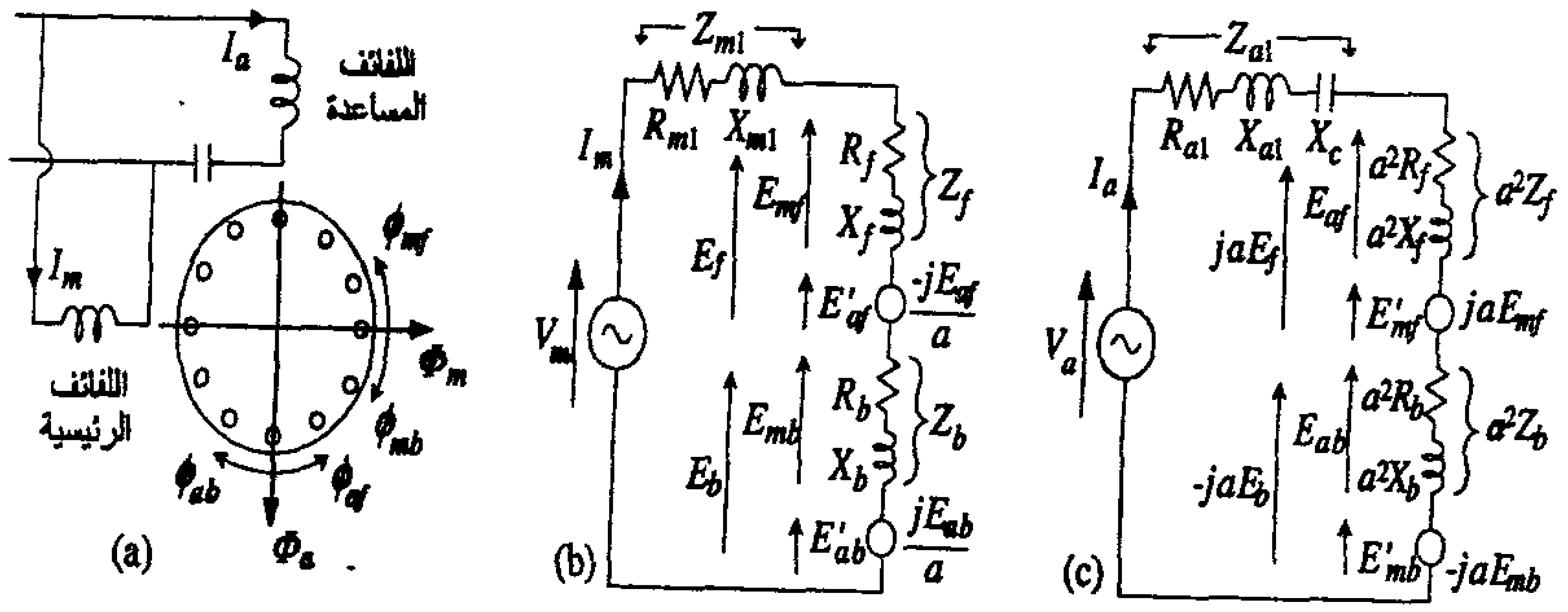
وبذلك يمكن تمثيل اللفائف الرئيسية بالدائرة المكافئة المبينة في الشكل (15b) حيث تمثل E'_{af} و E'_{ab} مركبات ق.د.ك المحتثة فيها بواسطة الفيض الامامي والعكسي للفائف المساعدة على الترتيب. كما يمكن تمثيل اللفائف المساعدة بالدائرة المكافئة المبينة في الشكل (15c) حيث تمثل E'_{mf} و E'_{mb} مركبات ق.د.ك المحتثة فيها بواسطة الفيض الامامي والعكسي للفائف الرئيسية. ولكون الدوار يمثل الثانوي المشترك لكل من اللفائف الرئيسية والمساعدة يمكن التعبير عن معاوقات الدوار الامامية والعكسية منسوبة الى اللفائف المساعدة Z_{af} و Z_{ab} بدلالة معاوقات الدوار منسوبة للفائف الرئيسية Z_f و Z_b والمعطاة بالمعادلتين (8.27) و (8.28) مضروبة في نسبة عدد لفات اللفائف المساعدة الى عدد لفات اللفائف الرئيسية

$(a=N_a/N_m)$ وكما يلي:

$$X_{am}=(N_a/N_m)^2X_m \quad ,Z'_{2m}= (N_m/N_2)^2Z_2 \quad , \quad Z'_{2a}= (N_a/N_2)^2Z_2 \qquad (8.44)$$

$$Z'_{2a}=(N_a/N_2)^2[(N_2/N_m)^2Z'_{2m}]=(N_a/N_m)^2 \ Z'_{2m} = a^2 Z'_{2m} \qquad (8.45)$$

$$Z_{af}=Z'_{2af}//j0.5X_{am}= a^2(Z'_{2f}//j0.5X_m) = a^2Z_f \, , Z_{ab} = a^2Z_b \qquad (8.46)$$



شكل (15) الدائرة المكافئة للمحرك الحثي احادي الطور العامل بالمكثف.

$$V_m= V_a = V \, , \qquad I_m + I_a = I \qquad (8.47)$$

$$E_f = E_{mf} +E'_{af} \, , \ E_b = E_{mb}+E'_{ab} \qquad (8.48)$$

$$E_{mf} = I_m Z_f \, ,E_{mb} = I_m Z_b \, , E_{af} = I_a a^2Z_f \, , \ E_{ab} = I_a a^2Z_b \qquad (8.49)$$

$$E'_{af}=-jE_{af}/a, \ E'_{ab}= jE_{ab}/a, \ E'_{mf} = jaE_{mf}, \ E'_{mb} = -jaE_{mb} \qquad (8.50)$$

ويمكن مما سبق التعبير عن جهود لفائف المحرك الحثي احادي الطور العامل بالمكثف وقدرته الخارجة وعزمه كما يلي:

$$V_m = I_m Z_{1m} + (E_{mf}+E'_{af}) + (E_{mb}+E'_{ab}) = I_m(Z_{m1}+Z_f+Z_b) - jaI_a(Z_f - Z_b) \qquad (8.51)$$

$$V_a = I_a Z_{1a} + (E_{af}+E'_{mf}) + (E_{ab}+E'_{mb}) = I_a(Z_{a1}+a^2 Z_f+a^2 Z_b) + jaI_m(Z_f - Z_b) \qquad (8.52)$$

$$P_{ef} = Re\{E_f I^*_m + jaE_f I^*_a\},\ P_{eb} = Re\{E_b\ I^*_m - jaE_b\ I^*_a\} \qquad (8.53)$$

$$T_{mf} = P_{ef}/\omega_s\ ,\ T_{mb} = P_{eb}/\omega_s\ ,\ T_m = T_{mf} - T_m \qquad (8.54)$$

3.8 أمثلة محلولة

1 - محرك حثي احادي الطور ذو قطبين بادئ بالمكثف مقنناته ½ hp، 120 V، 60 Hz المعاوقة الكلية المكافئة منسوبة للساكن عند السكون $Z_m = (4.5 + j\ 3.7)\ \Omega$ للفائفه الرئيسية و $Z_a = (9.5 + j\ 3.5)\ \Omega$ للفائفه المساعدة. احسب متسعة مكثف البدء اللازم توصيلها على التوالي مع اللفائف المساعدة لجعل تيارها متعامد مع تيار اللفائف الرئيسية.

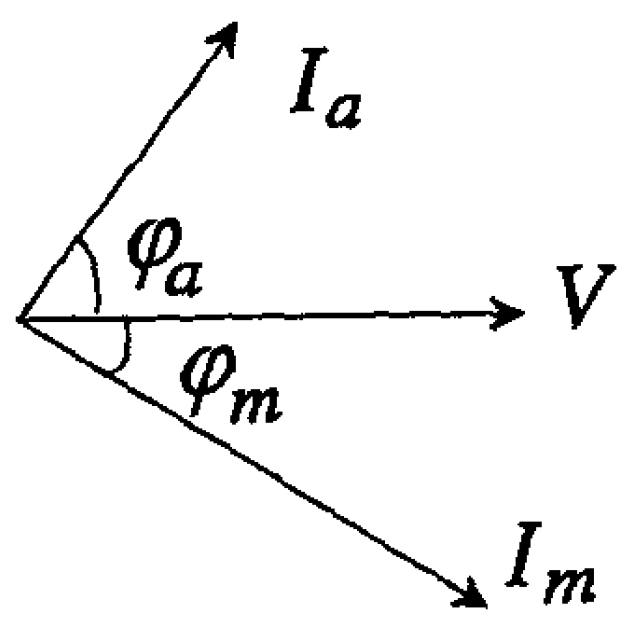
[176.204 μF]

0.5 hp, 120 V, 60 Hz

$Z_m = 4.5 + j\ 3.7\ \Omega$

$Z_a = 9.5 + j\ 3.5\ \Omega$

$\varphi_m = -\tan^{-1}(X_m/R_m)$



for $T_{st(max)}$:

$\varphi_{am} = \varphi_a - \varphi_m = 90.0°$

$\varphi_a = 90 + \varphi_m = 90 - 39.43 = 50.572°$

$\theta_a = -\varphi_a$, $\tan\theta_a = (X_a - X_c) / R_a$ $= -39.428°$

$X_c = X_a - R_a \tan\theta_a = 15.05405\ \Omega$

$C = 1 / (2\pi f X_c) = 176.2039\ \mu F$

2 - محرك حثي احادي الطور ذو 4 اقطاب بادئ بالمكثف مقنناته 1 hp، 120 V، 60 Hz المعاوقة الكلية المكافئة منسوبة للساكن عند السكون $Z_m = (4.82 + j\ 7.25)\ \Omega$ للفائفه الرئيسية و $Z_a = (7.95 + j\ 9.21)\ \Omega$ للفائفه المساعدة. احسب تيار اللفائف الرئيسية والمساعدة عند البدء ومتسعة مكثف البدء اللازم للحصول على اكبر عزم بدء ممكن وتيارات اللفائف عندها. [13.784∠-56.38° A, 9.863∠-49.2° A, 182.995 μF, 13.784∠-56.38° A, 12.570∠33.62° A]

1 hp, 120 V, 60 Hz

$Z_m = 4.82 + j\ 7.25\ \Omega$

$Z_a = 7.95 + j\ 9.21\ \Omega$

$I_m = V / Z_m = 13.7836\angle{-56.383°}\ A$

$I_a = V / Z_a = 9.86305\angle{-49.200°}\ A$

$\varphi_m = -\tan^{-1}(X_m / R_m) = -56.383°$

for $T_{st(max)}$: $\varphi_{am} = \varphi_a - \varphi_m = 90.0°$

$\varphi_a = 90 + \varphi_m = 33.617°$

$\tan\varphi_a = (X_a - X_c) / R_a$

$X_c = X_a - R_a \tan\varphi_a = 14.4954\ \Omega$

$C = 1 / (2\pi f X_c) = 182.9950\ \mu F$

$Z'_m = Z_m$, $I'_m = I_m = 13.7836\angle{-56.383°}\ A$

$Z'_a = Z'_a - j X_c = 7.95 - j\ 5.28539\ \Omega$

$I'_a = V / Z'_a = 12.5699\angle{33.617°}\ A$

3 - محرك حثي احادي الطور ذو 4 اقطاب مقنناته 100 V، 50 Hz ومقاومة ومفاعلة لفائفه الرئيسية في الساكن $R_1 = 2\ \Omega$، $X_1 = 2\ \Omega$ ومقاومة ومفاعلة الدوار منسوبة للساكن عند السكون $R'_2 = 4\ \Omega$، $X'_2 = 2\ \Omega$ ومفاعلة المغنطة $X_m = 60\ \Omega$. فاذا كان المحرك يعمل عند انزلاق 5% احسب معاوقات الدوار الامامية والعكسية وتيار المحرك والعزم الكلي المبدول بعد فصل اللفائف المساعدة. [14.057+j19.106, 0.9595+j0.9995, 3.585∠-52.41° A, 1.0715 Nm]

4 - محرك حثي احادي الطور ذو 4 اقطاب مجزاء الطور مقنناته 1 hp، 220 V، 50 Hz مقاومة ومفاعلة لفائفه الرئيسية في الساكن $R_1 = 4\ \Omega$، $X_1 = 4\ \Omega$ ومقاومة ومفاعلة قفص الدوار منسوبة للساكن عند السكون $R'_2 = 6\ \Omega$، $X'_2 = 3\ \Omega$ ومفاعلة المغنطة $X_m = 80\ \Omega$. فاذا كان المحرك يعمل عند انزلاق 0.05 والفقودات الدورانية 40 W احسب القدرة الداخلة وصافي العزم والكفاءة بعد فصل اللفائف المساعدة. [692.0335 W, 2.8506 Nm, 61.47%]

5 - محرك حثي احادي الطور ذو 6 اقطاب مقنناته ½ hp، 110 V، 60 Hz يعمل بسرعة 1140 rpm ومعاوقة لفائف الساكن الرئيسية (1.52 + j2.10) Ω ومعاوقة الدوار منسوبة الى الساكن (6.26 + j3.12) Ω ومفاعلة المغنطة 52.8 Ω والفقودات الدورانية 51 W؛ احسب التيار والقدرة التي يسحبها المحرك ومعامل القدرة وقدرة الثغرة الهوائية وصافي القدرة الميكانيكية والعزم الميكانيكي والكفاءة. [4.659∠-50.65° A, 324.97 W, 259.137 W, 195.18 W, 1.635 Nm, 60.06%]

6 - محرك حثي احادي الطور ذو 4 اقطاب مقنناته 1 hp ، 115 V ، 60 Hz معاوقة لفائف الساكن الرئيسية $(1.9 + j2.6)\ \Omega$ ومعاوقة اللفائف المساعدة $(12 + j6.5)\ \Omega$ ومعاوقة الدوار منسوبة الى الساكن $(3.6 + j2.6)\ \Omega$ ومفاعلة المغنطة $56\ \Omega$ ومفاعلة مكثف البدء $20\ \Omega$. فأذا كانت نسبة عدد لفات اللفائف المساعدة الى الرئيسية 1.6؛ احسب معاوقات الدوار الامامية والعكسية عند السكون وتيار وعزم البدء للمحرك. [(1.6376 + j1.3429) Ω, 18.564∠-30.6° A, 4.154 Nm]

7 - محرك حثي احادي الطور ذو 4 اقطاب عامل بالمكثف عدد لفات لفائفه المساعدة يساوي عدد لفات لفائفه الرئيسية ومعاوقة كل منهما في الساكن $(1.5 + j2)\ \Omega$ ومعاوقة الدوار منسوبة الى الساكن $(2.5 + j2)\ \Omega$ ومفاعلة المغنطة $48\ \Omega$ ومتسعة مكثف العمل $30\ \mu F$؛ فأذا كان المحرك يغذى من مصدر 120 V ، 60 Hz احسب معاوقات الدوار الامامية والعكسية عند السكون وتيار البدء الذي يسحبه المحرك وعزم البدء. [1.1995∠54.85° Ω, 23.4064∠-51.8° A, 0.3183 Nm]

8 - محرك حثي احادي الطور مقنناته ¼ hp ، 120 V تم قياس مقاومة الساكن للفائفه الرئيسية فكانت $2.9\ \Omega$ وكانت نتائج اختباره عند اللاحمل 120 V ، 3.5 A ، 125 W ونتائج اختباره عند اعاقة الدوار 43 V ، 5 A ، 140 W؛ احسب معاملات الدائرة المكافئة للمحرك والفقودات الدورانية. [R'_2=2.7 Ω, X_1=X'_2=3.263 Ω, X_m= 55.674 Ω, 81.206 W]

9 - محرك توالي عام المقاومة الكلية للفائف منتجه ومجاله 20 Ω والمحاثة الكلية لهما 1/π H يسحب تيار قدره 1 A عند تشغيله محملاً بسرعة 2000 rpm وتغذيته من مصدر تيار مستمر جهده 230 V. فاذا تم تغذية المحرك من مصدر تيار متردد 230 V، 50 Hz احسب معامل قدرة التيار وسرعة وعزم المحرك عند سحب 1 A. [0.9, 1782.125 rpm, 1 Nm]

10- محرك توالي عام مقنناته ¼ hp، 120 V ، 60 Hz ومقاومته ومحاثته الكلية 20 Ω و 0.25 H يعمل بسرعة 2000 rpm ويسحب تيار 0.6 A عند تغذيته من مصدر تيار مستمر 120 V. فاذا تم تغذية المحرك من مصدر تيار متردد 120 V وكان يسحب 0.6 A؛ احسب سرعة وعزم ومعامل قدرة تيار المحرك. [1737.8 rpm, 0.88, 031 Nm]

الفصل التاسع

الالات الخاصة

1.9 المقدمة

لعل من ابسط طرق الحصول على محرك احادي الطور هو استخدام محرك تيار مستمر كمحرك عام يغذى بالتيار المتردد. ويعتمد اتجاه العزم المنتج بآلة التيار المستمر على اتجاه تدفق التيار في لفائف المنتج وقطبية لفائف اقطاب المجال الرئيسية بحيث ينقلب اتجاه العزم بقلب اتجاه أي من تيار المنتج او المجال، ولكنه يعود الى اتجاهه السابق بقلب قطبية اللفائف الاخرى. ولذلك سيستمر محرك التيار المستمر في انتاج عزم في اتجاه ثابت اذا ثم قلب اتجاه تيار المنتج وتيار المجال معاً وبشكل آني وذاتي، وهو ما يحدث عند تغذية المحرك المثار ذاتياً من مصدر تيار متردد احادي الطور ينقلب تياره في كل نصف دورة.

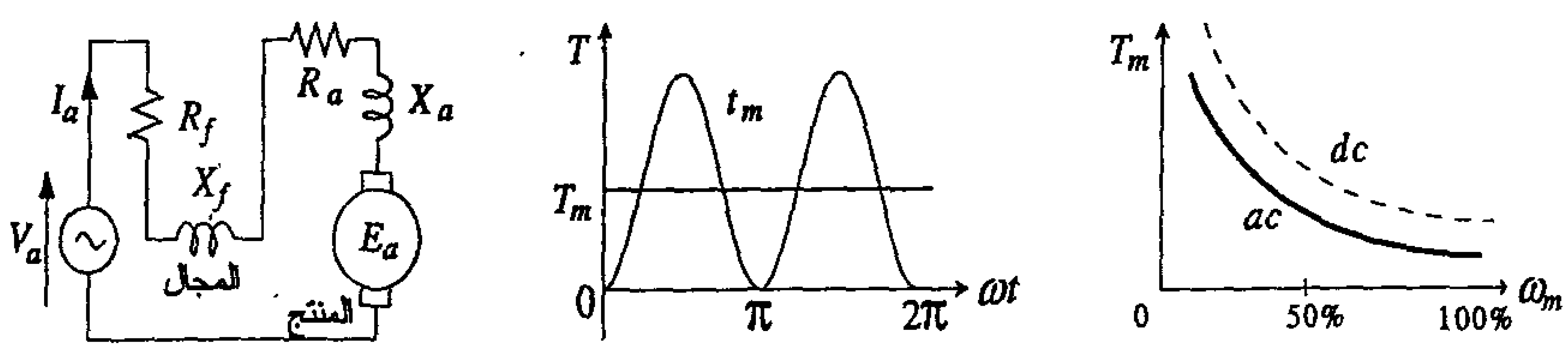
ويستخدم لهذا الغرض محرك الاثارة الذاتية المتوالية حيث لن يكون اداء محرك الاثارة المتفرعة مرضياً في هذه الحالة لكون محاثة اللفائف المتفرعة اكبر من محاثة المنتج مما يحدث ازاحة طورية كبيرة بين لحظة انقلاب تيار المنتج ولحظة انقلاب تيار المجال، ويؤدي بذلك الى انتاج عزم عكسي في جزء من كل نصف دورة مما يخفض من متوسط العزم المنتج وكفاءة الآلة. ويجب في هذه الحالة تصميم الآلة ليكون عضويها الساكن والدوار مصنوعة من شرائح معزولة من الحديد للحد من فقودات اللب المغناطيسية التي سيتسبب فيها تدفق الفيض المتردد في الآلة.

2.9– المحركات العامة ومحركات التنافر احادية الطور.

ويسمى مجرك التيار المستمر المصمم للعمل كمحرك احادي الطور بالمحرك العام (universal motor) او محرك التوالي (serial motor) ويميزه امكانية تغذيته من مصدر تيار مستمر او أي

مصدر تيار متردد يتراوح تردده من الصفر (dc) الى التردد الاساسي 50/60 Hz. وتتميز المحركات العامة بعزم البدء الكبير والسرعة العالية والتي قد تصل قيم عالية وفي حدود 20000 rpm عند اللاحمل حيث ستحدها الفقودات الميكانيكية ولكنها اقل من سرعة محرك التوالي عند تغذيته بتيار مستمر. ولذلك يميز المحرك العام صغر حجمه مقارنة بالمحركات احادية الطور الاخرى المساوية لها في القدرة وتغذى بنفس التردد. وتستخدم المحركات العامة في التطبيقات التي تتطلب سرعة عالية تفوق السرعة التزامنية وعزم بدء كبير مثل المثقاب والخلاط والمكانس الكهربائية في مدى القدرات الصغيرة ومحركات الجر والسحب في مدى القدرات الكبيرة.

ويبين الشكل (1) دائرة توصيلة المحرك العام وعزمه اللحظي وخاصية العزم/السرعة للمحرك. فإذا كان عدد موصلات المنتج Z وعدد مسارات لفائفه المتوازية a وعدد ازواج اقطاب الآلة p حيث يمكن بالعودة الى اساسيات آلات التيار المستمر وافتراض خطية الخصائص المغناطيسية للآلة التعبير عن عزم وق.د.ك المحرك العام عند تغذيته بتيار مستمر كما يلي:



شكل (1) تمثيل المحرك العام احادي الطور وخصائصه.

$$\Phi_a = K_\phi I_a , \qquad K_a = pZ/\pi a , \qquad K_e = K_\phi K_a$$

$$T_m = K_a \Phi_a I_a = K_e I_a^2, \qquad E_a = K_a \Phi_a \omega_m = K_e I_a \omega_m \quad (9.1)$$

وعند تغذية المحرك العام من مصدر تيار متردد وإهمال التيار الدوامي مع افتراض خطية الخصائص المغناطيسية يمكن التعبير عن ق.د.ك والعزم اللحظيين للمحرك وكذلك متوسط العزم وق.د.ك الفعالة ومعادلة القدرة والجهد كما يلي:

$$i_a = \hat{I}_a \cos \omega t , \quad \phi_a = \hat{\Phi}_a \cos \omega t \tag{9.2}$$

$$t_m = K_a \phi_a i_a = K_a \hat{\Phi}_a \hat{I}_a \cos^2 \omega t = ½ K_a \hat{\Phi}_a \hat{I}_a (1+\cos 2\omega t) \tag{9.3}$$

$$e_a = K_a \phi_a \omega_m = K_a \hat{\Phi}_a \omega_m \cos \omega t \tag{9.4}$$

$$T_m = ½ K_a \hat{I}_a \hat{\Phi}_a = K_e I_a^2 \tag{9.5}$$

$$E_a = K_a \hat{\Phi}_a \omega_m / \sqrt{2} = K_e I_a \omega_m \tag{9.6}$$

$$P_m = E_a I_a , \quad T_m = P_a / \omega_m = E_a I_a / \omega_m \tag{9.7}$$

$$V_a = E_a + I_a [(R_a + R_f) + j(X_a + X_f)] \tag{9.8}$$

ومن المحركات المشابهة للمحرك العام محرك التنافر (repulsion motor) وفيه يتم تغذية لفائف المجال فقط ويتم قصر فرش المنتج ليعمل محرك التنافر كمحرك حثي بلفائف دوار ذات مبدل. ولم تعد هذه المحركات مستخدمة اليوم لكلفة تصنيعها وصيانتها العالية وعدم ذاتية بدئها حيث استعيض عنها بمحركات المكثف الحثية ذات التكلفة الاقل والأداء الجيد.

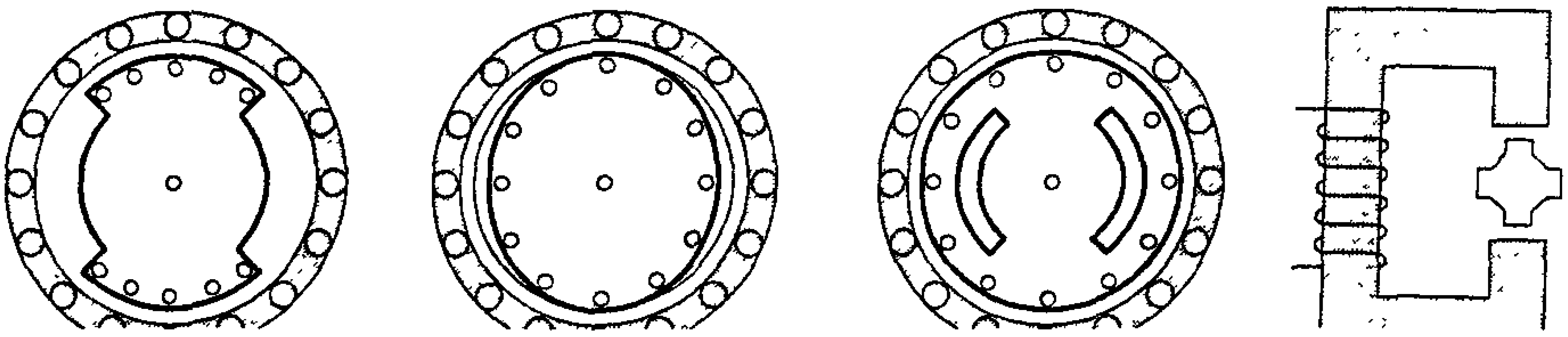
3.9 – المحركات التزامنية احادية الطور.

لعل من اهم ما يميز المحركات التزامنية عن محركات التيار المتردد الاخرى أن عضوها الدوار يدور في الحالة الثابتة بسرعة التزامن الثابتة والتي يحددها تردد تيار المصدر الذي يغذى المنتج ولا تتغير مع

الحمل الميكانيكي كما في المحركات الحثية ومحركات التيار المستمر. وبينما تستخدم المحركات ثلاثية الطور الكبيرة بقدرات قد تصل 10 MW في بعض التطبيقات الصناعية التي تتطلب سرعات ثابتة، فإن المحركات التزامنية احادية الطور الصغيرة تستخدم بقدرات في حدود الحصان واقل في التطبيقات التي تتطلب بالمثل سرعة ثابتة مثل الساعات والمؤقتات والعدادات. ومن اكثر المحركات التزامنية الصغيرة انتشاراً محركات الممانعة ومحركات التخلف والذين لا يتطلبان تيار مستمر للاثارة.

1.3.9 – محركات الممانعة التزامنية.

تعد محركات الممانعة من ابسط محركات التيار المتردد في بنيتها اذ لا تتطلب مواصلة عملها بعد البدء أي لفائف في الدوار. ويمكن تشغيل أي محرك تيار متردد تنتج لفائف عضوه الساكن ق.د.م دوارة كمحرك ممانعة تزامني اذا توفرت فيه وسيلة بدء مناسبة وتم تصميم الدوار ليبدئ ممانعة متغيرة للفيض كدالة في الزاوية بين محور الدوار ومحور لفائف الساكن اثناء الدوران. ولذلك يكون دوار محرك الممانعة بارز الاقطاب او يعطى نفس تأثير ويضم لفائف قفص سنجابي لاستخدامها كوسيلة بدء حثية، كما يضم الساكن لفائف بدء مساعدة مع اللفائف احادية الطور الرئيسية وكما هو مبين في الشكل (2). ومن انواع محركات الممانعة النادرة محرك الممانعة دون التزامنية (subsynchronous) التي تستند في عملها الى ق.د.م نابضة وليس دوارة.



شكل (2) اربعة اشكال ممكنة لدوار محرك ممانعة حثي البدء.

ويعمل محرك الممانعة التزامني استناداً الى قوى الشد المغناطيسية الناتجة عن سعي اقطاب الدوار البارزة للاصطفاف مع خطوط فيض ق.د.م الدوارة. وكما في الآلات التزامنية الكبيرة بارزة الاقطاب يتم تمثيل محرك الممانعة بمفاعلتين مباشرة X_d ومتعامدة X_q حيث $X_d>X_q$ لتمثيل مركبة فيض المحور المباشر عبر اقطاب الدوار البارزة ومركبة فيض المحور المتعامد عليه. ولقد تبين عند دراسة الآلات التزامنية ثلاثية الطور ان عزم الآلة بارزة الاقطاب يشمل مركبة صغيرة نسبياً تعود لبروز الاقطاب ولا علاقة لها بالإثارة تعرف بعزم الممانعة (reluctance torque) اذ يبدلها المحرك حتى عند فتح لفائف المجال. وبنفس المبدأ يعمل محرك الممانعة التزامني اعتماداً على عزم الممانعة حيث يمكن التعبير عن قدرة وعزم المحرك كما يلي:

$$P_m = \frac{1}{2}V^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta \qquad (9.9)$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_s} = \frac{V^2}{2\omega_s}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta \qquad (9.10)$$

وعند بدء محرك الممانعة احادي الطور حثياً بواسطة اللفائف المساعدة والقفص السنجابي في الدوار وتجاوزها حوالى ثلاثة ارباع سرعة التزامن يتم فصل اللفائف المساعدة بمفاتح الطرد المركزي او

غيره ليستمر المحرك في التسارع كمحرك حثي وتلاحق اقطاب الدوار مجال ق.د.م الدوارة لتصطف معه الى ان تصل سرعة الدوار قريباً من سرعة التزامن وعندها يقفز محور اقطاب الدوار بسهولة الى محور ق.د.م الدوارة ويتعلق به ليدور معه بسرعة التزامن. وعند وصول الدوار سرعة التزامن تنعدم السرعة النسبية بين قضبان القفص السنجابي وق.د.م الدوارة لتصبح هذه اللفائف هامدة لا جهد فيها ولا تيار. وسيتأثر اداء محرك الممانعة احادي الطور بمركبة العزم العكسية والذي يشبه تأثير حمولة اضافية على عمود الدوران.

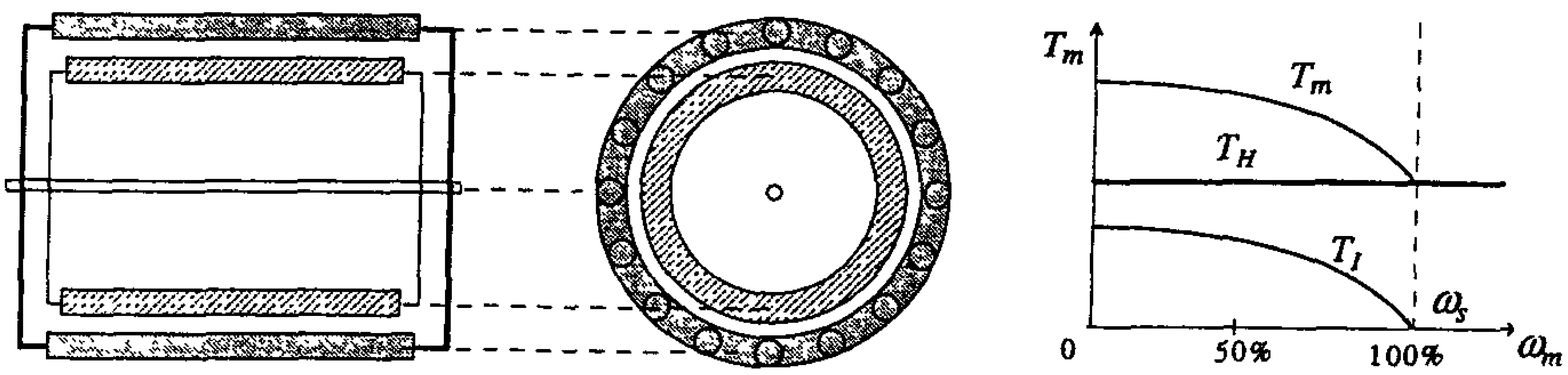
ويعيب محرك الممانعة التزامني انخفاض كفاءته ومعامل قدرة تياره لكونه يتطلب تيار متفاعل كبير للاثارة عوضاً عن تيار لفائف المجال في المحرك التزامني الاعتيادي. ويتسبب غياب لفائف الاثارة في خفض العزم الاعظم لمحرك الممانعة التزامني وهو ما يجعل حجمه اكبر كثيراً من المحرك التزامني الاعتيادي المناظر له في مقنن القدرة والسرعة والذي يضم لفائف تيار مستمر للاثارة في عضو المجال. وفي المقابل يعطي عدم وجود حلقات منزلقة وفرش ولفائف اثارة ميزة البساطة ورخصة تكلفة التصنيع والصيانة لمحرك الممانعة والتي تجعله يفضل على المحرك التزامني العادي في بعض التطبيقات التي تتطلب سرعة ثابتة مثل الساعات والمؤقتات والعدادات وأجهزة العرض والتسجيل المرئي والصوتي.

2.3.9 – محركات التخلف التزامنية.

يعود انتاج العزم في محركات التخلف (hysteresis motors) التزامنية الى خاصية التخلف المغناطيسية كما تبينها العلاقة بين كثافة الفيض والإجهاد المغناطيسي عبر المواد الفيرومغناطيسية

المستخدمة في الآلة الكهربائية عند تعرضها لفيض متردد. ويضم دوار محرك التخلف حلقة (اسطوانة مفرغة) مصنوعة من مادة فيرومغناطيسية عالية الجودة مثبتة على اسطوانة (مصمته) من مادة غير مغناطيسية. ويضم الساكن لفائف موزعة لإنتاج ق.د.م دوارة وهي عادةً ما تكون في المحركات احادية الطور مشابهة للفائف المحرك الحثي العامل بالمكثف حيث يتم تصميم اللفائف الرئيسية والمساعدة ليكون ادائها اقرب ما يمكن الى محرك النظام ثنائي الطور المتزن.

وستؤدي ق.د.م الدوارة للساكن الى احتثاث تيارات دوامية في الدوار ومغنطة حديد الدوار بشكل متناوب مما ينتج عزم تخلف يعود الى تخلف تغير كثافة الفيض في حديد الدوار عن تغير قوة التمغنط الناتجة عن ق.د.م الدوارة. ويبين الشكل (3) ق.د.م الساكن وق.د.م الناتجة عن مغنطة الدوار لمحرك التخلف حيث تتخلف ق.د.م الدوار بزاوية محددة بين محوري فيوض الساكن والدوار. وسيؤدي وجود زاوية التخلف الى انتاج عزم باتجاه ق.د.م الساكن يتناسب مع هذه الزاوية حيث لا يوجد تيار اثارة في الدوار. ولعدم ارتباط زاوية التخلف بسرعة الدوران يكون عزم الخلف ثابتاً لغاية السرعة التزامنية. وفي هذه الحالة سيعتمد مقدار عزم التخلف فقط على مساحة دارة التخلف المغناطيسي للحلقة الفيرومغناطيسية للدوار وكثافة فيض الثغرة الهوائية.



شكل (3) محرك وخصائص محرك التخلف التزامني.

وعند البدء وطالما كانت سرعة الدوار دون سرعة التزامن سيظل الدوار متعرضاً الى عزم التخلف الناتج عن دارات التخلف المتكررة وفقاً لتردد الانزلاق، اضافة الى عزم حثي ينتج عن تفاعل المجال المغناطيسى والتيارات الدوامية التي يحثها هذا المجال المتردد في حديد الدوار. وبسبب مقاومة كتلة الدوار العالية سينخفض العزم الحثي خطياً ليصل الصفر عند سرعة التزامن حيث يصبح المجال ثابتاً بالنسبة لحديد الدوار. وبذلك يكون العزم الكلي لمحرك التخلف عبارة عن مجموع عزم التخلف والعزم الحثي وهو ينخفض قليلاً وخطياً بين السكون وسرعة التزامن وكما هو مبين في الشكل (3). وبشكل عام يعيب محركات التخلف انخفاض معامل قدرة تيارها والكلفة العالية للسبائك المغناطيسية المستخدمة فيها.

4.9 – محركات المغناطيس الدائم التزامنية.

الفصل العاشر

مدخل الى ديناميكا الآلات

1.10 مقدمة.

تستند معظم الدراسات الخاصة بدراسة اداء الآلات الكهربائية الى تبسيط النموذج العام للآلة الى نموذج الحالة الثابتة الذي يمكن استخدامه لدراسة سلوك الآلة في الحالة الاعتيادية المستقرة. ولكن سلوك هذه الآلات قد يكون مختلفاً بدرجة كبيرة عند تعرض الآلة لاضطراب ما وانتقالها من حالة الى اخرى. وتمر الآلة بفترة عابرة لاعادة الضبط بين حالة التشغيل الثابتة السابقة للاضطراب (الحالة الابتدائية) وحالة التشغيل الثابتة التي تستقر عندها الآلة بعد انتهاء الاضطراب (الحالة النهائية). وتتطلب الكثير من دراسات آلات التيار المستمر وآلات التيار المتردد بنوعيها التزامني والمتردد معرفة السلوك العابر للآلة (أي استجابتها للاضطراب) خلال الفترة العابرة بما فيها الدراسات الخاصة ببدء التشغيل ونظم التحكم في الآلة. وعادة ما يشار الى السلوك الكهربائي للآلة اثناء الفترة العابرة بالسلوك العابر (transient) ويشار الى سلوكها الميكانيكي اثناء ذلك بالسلوك الديناميكي. وعادةً ما يكون تحليل السلوك العابر والديناميكي للآلات الكهربائية غايةً في التعقيد وهو ما يستدعي في الكثير من الحالات بعض الافتراضات لتبسيط تناول المسألة.

2.10 سلوك آلات التيار المستمر.

تتميز آلات التيار المستمر بسهولة التحكم فيها وهو ما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تتطلب التحكم في السرعة على مدى واسع والتطبيقات التي تتطلب التحكم الدقيق في المتغيرات الاخرى مثل التحكم في الازاحة في النظم التنفيذية (servo drives). وعادةً ما يستند التحليل الى الافتراضات التالية لتبسيط تعقيدات التحليل عند

التعامل مع الآلة كجزء من نظم التحريك والتحكم:

1 – اهمال التشبع المغناطيسي لحديد الآلة وهو ما يعني عدم اعتماد المحاثات على التيار.

2 – اعتبار ق.د.م المجال تعمل على طول المحور المباشر، وق.د.م المنتج تعمل على طور المحور المتعامد. وهو ما يعني عدم وجود محاثة تبادلية بين دائرتي المنتج والمجال وعدم وجود تأثير مضاد للمغنطة نتيجة لرد فعل المنتج.

وقد جرى العرف على اخذ هذه الافتراضات في الاعتبار لدراسة السلوك (الكهربائي) العابر لآلة التيار المستمر عند تشغيلها كمولد وكذلك دراسة سلوكها (الميكانيكي) الديناميكي عند تشغيلها كمحرك. ولتبسيط هذه المفاهيم يتم وصف سلوك الآلة بواسطة المعادلات التى يمكن من خلالها اشتقاق دوال التحويل التي تحدد العلاقة بين متغيرات الخرج والمدخلات في مخطط كتل للحصول على استجابة النظام نتيجة لتعرضه لتغير فجائي في الدخل.

1.2.10 السلوك العابر لمولد التيار المستمر.

وبالعودة الى اساسيات آلات التيار المستمر والافتراضات السابقة يمكن تمثيل محاثة المنتج بمحاثة المحور المتعامد La لكون ق.د.م رد فعل المنتج تعمل على طول المحور المتعامد فقط، كما يمكن اعتبار فيض المجال Φ يتناسب خطياً مع تيار المجال if اي $\Phi=K_{\phi}\ if$ بسبب اهمال التشبع وافتراض خطية خصائص الدائرة المغناطيسية للآلة. وبذلك يمكن التعبير عن العلاقة بين ق.د.ك المنتج e_a وسرعة الدوار ω_m وبين عزم المنتج T_a وتيار المنتج i_a لمولد التيار المستمر مستقل

الاثارة المبين في الشكل (1) مع منحنى مغنطته بالمعادلات التالية:

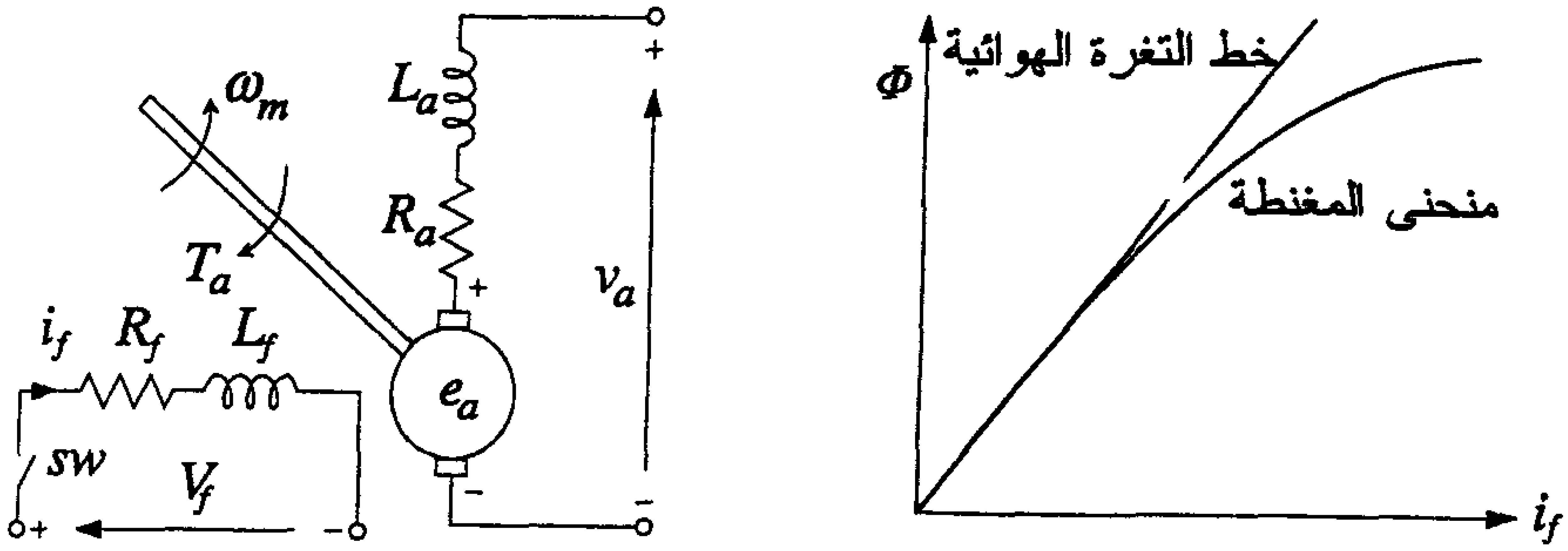
$$\Phi = K_{\phi}\, i_f \qquad (10.1)$$

$$e_a = K_a \Phi \omega_m = K_f\, i_f\, \omega_m \qquad (10.2)$$

$$T_a = K_a\, \Phi\, i_a = K_f\, i_f\, i_a \qquad (10.3)$$

$$K_f = K_{\phi}\, K_a\,, \qquad K_a = pZ/\pi a \qquad (10.4)$$

حيث يعرف K_a بثابت منتج الآلة و Z عدد موصلات المنتج و a عدد مساراتها المتوازية و p عدد ازواج اقطاب المجال.



شكل (1) المولد منفصل الاثارة.

2.1.10. 1. السلوك العابر لدائرة المجال.

يمكن دراسة السلوك العابر لدائرة المجال بالنظر الى الاستجابة العابرة للمولد منفصل الاثارة المبين في الشكل (1) والناتجة عن تغير مستوى الاثارة (بتغير جهد دائرة الاثارة). وعند فتح دائرة المنتج ودوران المولد عند سرعة ثابتة ω_m يمكن التعبير عن معادلة جهد دائرة المجال عند غلق المفتاح SW كما يلي:

$$V_f = R_f\, i_f + L_f\, di_f/dt \qquad (10.5)$$

وبتطبيق تحويل لابلاس على المعادلة (10.5) واعتبار جهد الحالة الابتدائية صفر تكون الصيغة الترددية للمعادلة (10.5) كما يلي:

$$V_f(s) = R_f i_f(s) + L_f sI_f(s) = I_f(s)(R_f + s L_f) \quad (10.6)$$

وباعادة ترتيب المعادلة (10.6) نحصل على دالة التحويل التي تربط بين تيار المجال وجهد المجال كما يلي:

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + sL_f} = \frac{1}{R_f(1+s\tau_f)} \quad (10.7)$$

$$\tau_f = L_f / R_f = \text{الثابت الزمني لدائرة المجال} \quad (10.8)$$

وعند ثبوت السرعة ω_m يمكن التعبير عن ق.د.ك المتولدة بين اطراف دائرة المنتج المفتوح من المعادلة (10.2) كما يلي:

$$e_a = K_f i_f \omega_m = K_g i_f \quad (10.9)$$

$$K_g = K_f \omega_m = \text{ميل خط الثغرة الهوائية} \quad (10.10)$$

وتمثل K_g ميل الجزء الخطي من منحنى المغنطة الذي يمثل العلاقة بين ق.د.ك المحتثة e_a وتيار المجال i_f عند سرعة محددة ω_m. وبتطبيق تحويل لابلاس على المعادلة (10.10) نحصل على دالة التحويل بين تيار المجال وق.د.ك المنتج كما يلي:

$$E_a(s) = K_g I_f(s) \quad (10.11)$$

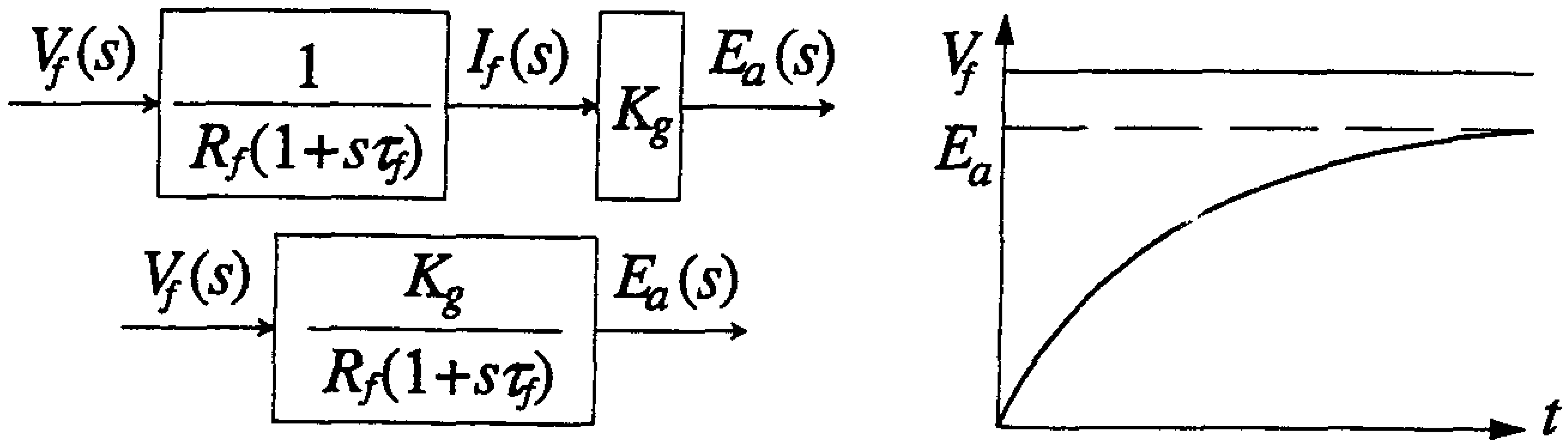
ومن المعادلتين (10.7) و (10.11) نحصل على دالة التحويل التي تربط بين جهد اطراف المنتج وجهد دائرة المجال كما يلي:

$$\frac{E_a(s)}{V_f(s)} = \frac{E_a(s)}{I_f(s)} \frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{K_g}{R_f(1+s\tau_f)} \quad (10.12)$$

ويمكـن تمثيـل دوال التحويـل للمعـادلات (10.7) و (10.11) و (10.12) بمخططات الكتل المبينة في الشكل (2). وبتطبيق معكـوس لابلاس يمكن الحصول على الاستجابة الزمنية لدالة التحويل للمعادلة (10.12) كما يلي:

$$E_a(s)=\frac{K_g V_f(s)}{R_f}\frac{1}{1+s\tau_f} \qquad (10.13)$$

$$e_a(t)=\frac{K_g V_f}{R_f}(1-e^{-t/\tau_f})=E_a(1-e^{-t/\tau_f}) \qquad (10.14)$$



شكل (2) الاستجابة العابرة لدائرة المجال.

ق.د.ك الحالة الثابتة = $E_a = e_a(\infty) = K_g V_f / R_f = K_g I_f$

(10.15)

تيار المجال في الحالة الثابتة = $I_f = V_f / R_f$ (10.16)

وتمثل الدالة المبينة في الشكل (2) استجابة زمنية من الرتبة الاولى بثابت زمني τ_f. وعادةً ما يكون الثابت الزمني لدائرة المجال كبير نسبياً مقارنة بدائرة المنتج حيث يبلغ مداه حوالى 0.1 الى 2 ثانية.

2.1.10 .2 السلوك العابر لدائرة المنتج.

يمكن دراسة السلوك العابر لدائرة المنتج بالنظر الى الاستجابة العابرة للمولد منفصل الاثارة المبين في الشكل (3) والناتجة عن توصيل

حمولة ذات مقاومة R_L ومحاثة L_L بين اطراف المنتج. فاذا كان المنتج يدور بسرعة ثابتة وكان تيار المجال كذلك ثابتاً وتم توصيل الحمولة في اللحظة $t=0$ بغلق المفتاح sw يمكن التعبير عن معادلة جهد دائرة المجال عند كما يلي:

$$e_a = R_{at}\, i_a + L_{at}\, di_a/dt \qquad (10.17)$$

$$R_{at} = R_a + R_L = \text{المقاومة الكلية لدائرة المنتج} \qquad (10.18)$$

$$L_{at} = L_a + L_L = \text{المحاثة الكلية لدائرة المنتج} \qquad (10.19)$$

وبتطبيق تحويل لابلاس على المعادلة (10.17) نحصل على الاستجابة الترددية لدائرة المنتج ودالة التحويل المناظرة كما يلي:

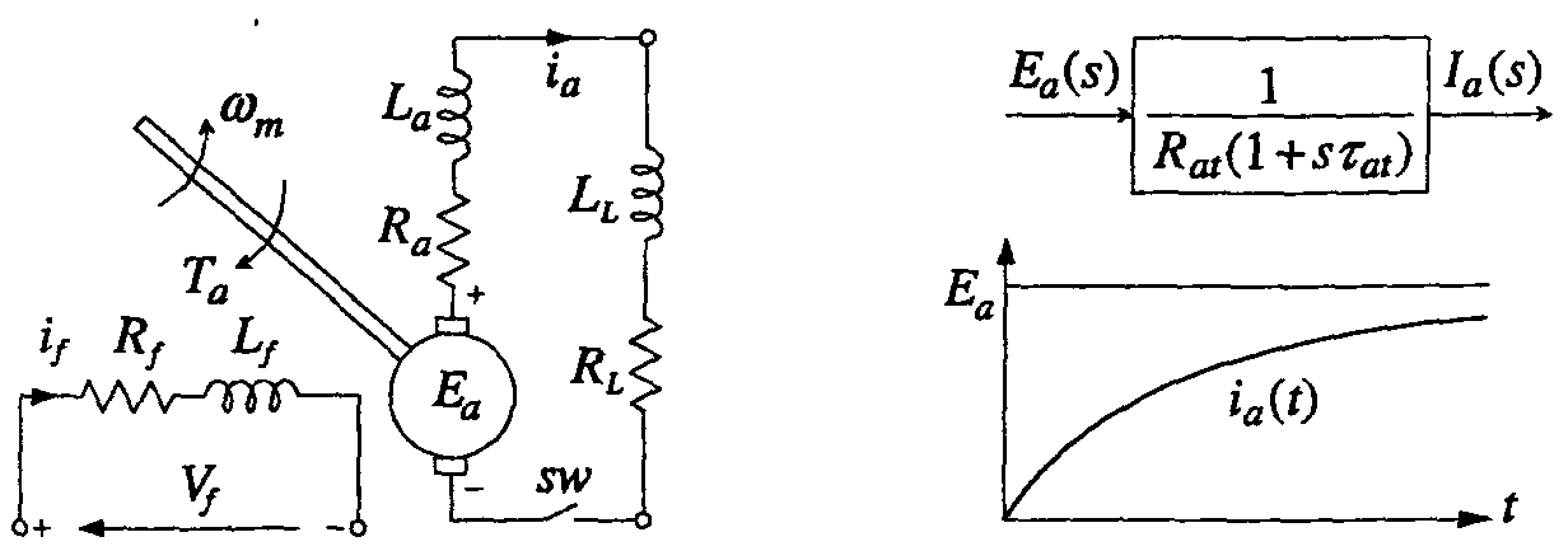
$$E_a(s) = R_{at}\, I_a(s) + L_{at}\, s\, I_a(s) \qquad (10.20)$$

$$\frac{I_a(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{R_{at}(1+s\tau_{at})} \qquad (10.21)$$

$$\tau_{at} = L_{at}/R_{at} = \text{الثابت الزمني لدائرة المنتج} \qquad (10.22)$$

ويمكن تمثيل دالة التحويل للمعادلة (10.22) بمخطط كتل كما في الشكل (3). وبتطبيق معكوس لابلاس يمكن الحصول على الاستجابة الزمنية لدالة التحويل للمعادلة (10.22) كما يلي:

$$i_a(t) = \frac{E_a}{R_{at}}(1-e^{-t/\tau_{at}}) = I_a(1-e^{-t/\tau_{at}}) \qquad (10.23)$$



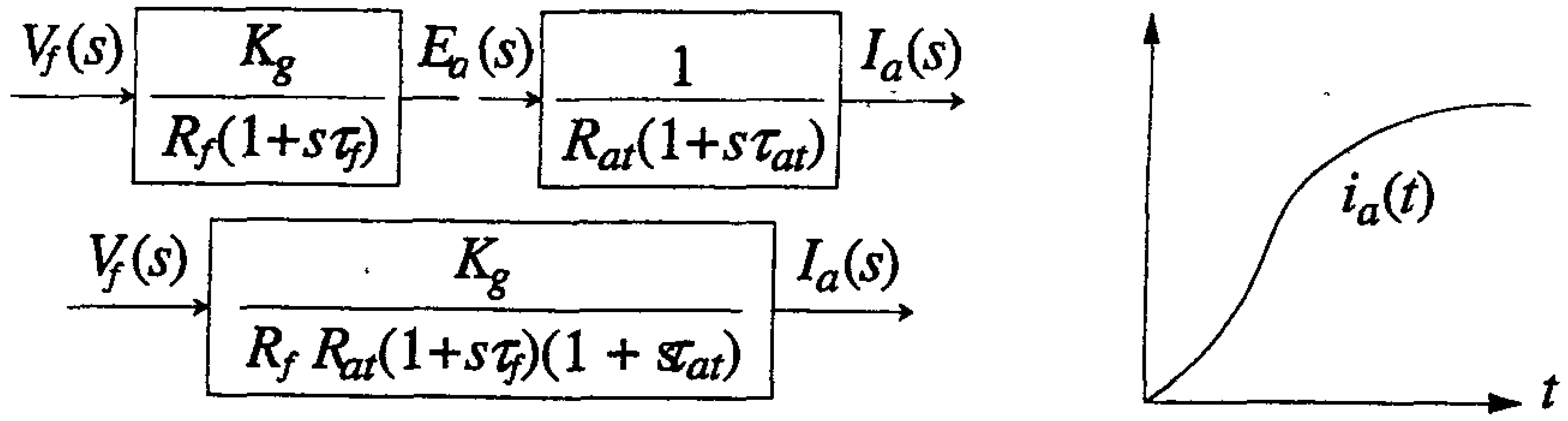
شكل (3) المولد منفصل الاثارة.

وتمثل المعادلة (23.10) استجابة زمنية من الرتبة الاولى بثابت زمني τat. وعادةً ما يكون الثابت الزمني لدائرة المنتج صغير نسبياً مقارنة بدائرة المجال حيث يتم بناء i_a للقيمة الثابتة بسرعة عالية.

ويمكن من المعادلتين (10.12) و (10.21) الحصول معادلة التحويل الكلية للحالة العابرة للمولد منفصل الاثارة والتي تحدد العلاقة بين تيار المنتج (الحمولة) وجهد دائرة المجال كما يلي:

$$\frac{I_a(s)}{V_f(s)}=\frac{I_a(s)}{E_a(s)}\frac{E_a(s)}{V_f(s)}=\frac{K_g}{R_f R_{at}(1+s\tau_f)(1+s\tau_{at})} \quad (10.24)$$

ويمكن تمثيل دالة التحويل للمعادلة (10.24) بمخططات الكتل المبينة في الشكل (4). وعند حدوث تغير خطوة (step change) في جهد دائرة المجال وبالتعويض عن ذلك في المعادلة (10.24) يمكن التعبير عن تيار المنتج كما يلي:



شكل (4) الاستجابة العابرة لدائرتي المجال والمنتج.

$$Vf(s)= Vf/s \quad (10.25)$$

$$I_a(s)=\frac{K_g V_f}{R_f R_{at}\, s(1+s\tau_f)(1+s\tau_{at})}$$

$$I_a(s)=\frac{K_g V_f}{R_f R_{at}\, s\tau_f\,\tau_{at}(s+1/\tau_f)(s+1/\tau_{at})} \quad (10.26)$$

$$I_a(s) = \frac{A}{s(s+1/\tau_f)(s+1/\tau_{at})} \;,\; A = \frac{K_g V_f}{R_f R_{at} \tau_f \tau_{at}} \quad (10.27)$$

$$I_a(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s+1/\tau_f} + \frac{A_3}{s+1/\tau_{at}} \quad (10.28)$$

$$A_1 = \left.\frac{A}{(s+1/\tau_f)(s+1/\tau_{at})}\right|_{s=0} = A\tau_f \tau_{at}$$

$$A_2 = \left.\frac{A}{s(s+1/\tau_{at})}\right|_{s=-1/\tau_f}$$

$$A_3 = \left.\frac{A}{s(s+1/\tau_f)}\right|_{s=-1/\tau_{at}} \quad (10.29)$$

وبتطبيق معكوس تحويل لابلاس يمكن الحصول على الاستجابة الزمنية لدالة التحويل للمعادلة (10.28) كما يلي:

$$i_a(t) = A_1 + A_2 e^{-t/\tau_f} + A_3 e^{-t/\tau_{at}} \quad (10.30)$$

$$A_1 = i_a(t=\infty) = i_a(s=0) = (K_g V_f) / (R_f R_{at}) = K_g I_f / R_{at} = E_a / R_a = I_a \quad (10.31)$$

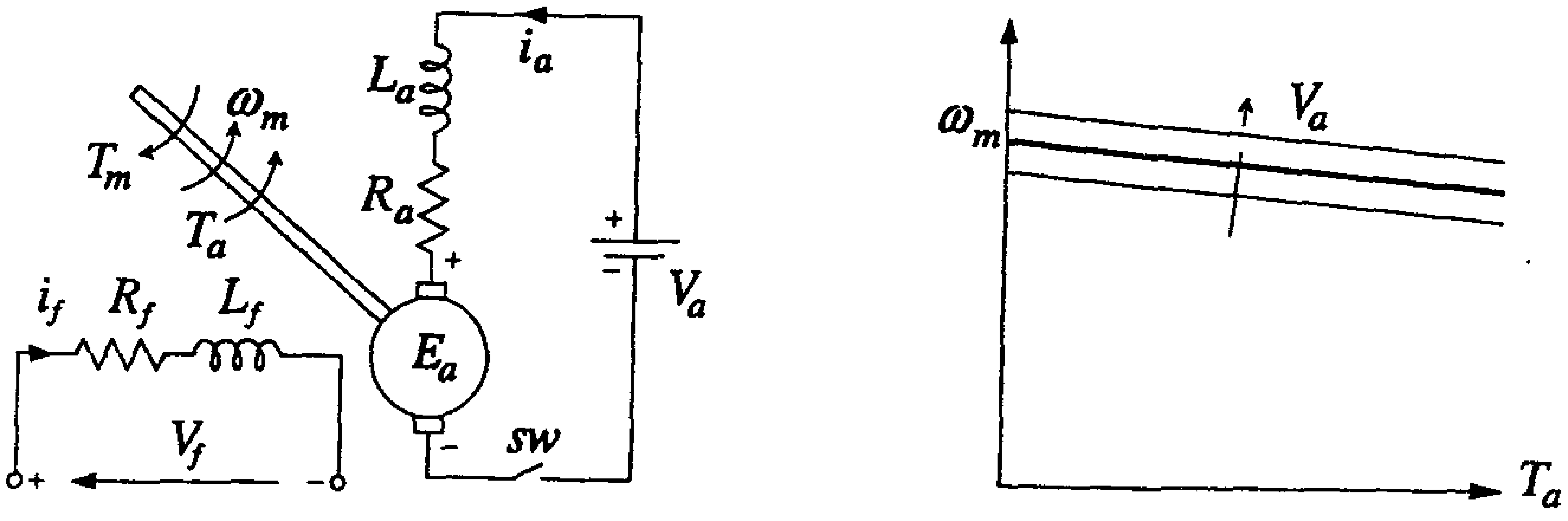
وبذلك يتضح ان A_1 تيار الحالة الثابتة لدائرة المنتج، ويبين الشكل (4) استجابة تيار المنتج لتغير خطوة في جهد دائرة المجال.

2.2.10 السلوك الديناميكي لمحرك التيار المستمر.

وتمتاز محركات التيار المستمر بصفة خاصة بخصائص تحميلها التي تمكن من التحكم الدقيق في سرعتها وعزمها وعلى نطاق تحميل واسع وبسهولة نسبية. وبينما تستخدم المحركات الكبيرة في مختلف العمليات الصناعية مثل تدوير المراوح والمضخات والروافع

والمدلفنات وتطبيقات الجر والسحب كما هو الحال في السيارات والقاطرات الكهربائية، فإن المحركات الصغيرة تستخدم على نطاق واسع في انظمة التحكم والمراقبة. ولذلك تلعب آلات التيار المستمر دوراً ذو اهمية كبرى في الصناعة.

ويتطلب التقييم الشامل لاداء محرك التيار المستمر معرفة العلاقة بين السرعة وتيار المنتج والعلاقة بين عزم المنتج وتيار المنتج وبينه وبين جهد المنتج وكذلك العلاقة بين العزم والسرعة الذي يعرف بخاصية الحمل. وفي الطرق العامة لنظم التحكم يتم استخدام محرك تيار مستمر منفصل الاثارة تتم اثارة مجاله بتيار ثابت من مصدر مناسب وكما هو مبين في الشكل (5). ويتم التحكم الدقيق في السرعة بتغيير الجهد المسلط على اطراف منتج المحرك حيث عادةً ما يغذى المحرك بواسطة مقومات محكومة. ويتطلب تقييم اداء نظام التحكم في سرعة المحرك دراسة كل من السلوك الكهربائي العابر في دائرة المنتج والسلوك الميكانيكي الديناميكي للنظام الميكانيكي الذي يديره المحرك.



شكل (5) دائرة وخصائص المحرك منفصل الاثارة.

2.2.10 .1. السلوك العابر لدائرة المجال.

وبأخذ الافتراضات المذكور في الفقرة (10.2) في الاعتبار وافتراض ثبوت تيار اثارة المجال لجميع مستويات التحميل والسرعة يمكن التعبير عن اداء محرك التيار المستمر منفصل الاثارة والمبين في الشكل (5) بالمعادلتين الاساسيتين التاليتين:

$$T_a = K_f \, i_f \, i_a = K_m \, i_a \qquad (10.32)$$

$$e_a = K_f \, i_f \, \omega_m = K_m \omega_m \qquad (10.33)$$

$$K_m = K_f \, i_f = \text{عامل الكسب} \qquad (10.34)$$

وبتطبيق تحويل لابلاس على المعادلتين (10.32) و (10.33) نحصل على الصيغة الترددية التالية لدوال استجابة النظام:

$$T_a(s) = K_m \, I_a(s) \qquad (10.35)$$

$$e_a(s) = K_m \omega_m(s) \qquad (10.36)$$

واذا تم غلق المفتاح SW في اللحظة صفر ($t=0$) يمكن التعبير عن معادلة جهد دائرة المنتج في نطاق الزمن كما يلي:

$$V_a = e_a + R_a \, i_a + L_a \, di_a/dt \qquad (10.37)$$

وبالتعويض عن e_a من المعادلة (10.36) في المعادلة (10.37) واعادة ترتيبها وتطبيق تحويل لابلاس عليها واعتبار تيار الحالة الابتدائية صفر نحصل على الصيغة الترددية التالية للمعادلة (10.37) كما يلي:

$$V_a = K_m \omega_m + R_a \, i_a + L_a \, di_a/dt \qquad (10.38)$$

$$V_a(s) = K_m \omega_m(s) + R_a \, I_a(s) + L_a(s) \, s \, I_a(s) \qquad (10.39)$$

$$V_a(s) = K_m \omega_m(s) + I_a(s) R_a (1 + s\tau_a) \quad (10.40)$$

$\tau_a = L_a / R_a =$ الثابت الزمني الكهربائي للمنتج (10.41)

2.2.10. السلوك الديناميكي للعضو الدوار.

يمكن من اساسيات ديناميكا الكتل الدوارة بالتعبير عن الاستجابة الديناميكية للعضو الدوار لمحرك التيار المستمر بمساواة عزم التسارع (الفارق بين العزم الكهربائي المبذول T_a والعزم الميكانيكي T_m) وحاصل ضرب عزم القصور المشترك للحمولة والمحرك J في التسارع الزاوي (تفاضل السرعة الزاوية ω_m) وكما يلي:

$$J\, d\omega_m / dt = T_a - T_m \quad (10.42)$$

$$T_a = K_m i_a, \qquad T_m = B_m \omega_m + T_L \quad (10.43)$$

حيث T_L عزم الحمولة و $B_m \omega_m$ الفقد الميكانيكي و B_m معامل الاخماد للحمولة والمحرك ومن المعادلتين نجد (10.42) و (10.43):

$$T_a = K_m i_a = J\, d\omega_m / dt + B_m \omega_m + T_L \quad (10.44)$$

وبتطبيق تحويل لابلاس على المعادلة (44.10) نحصل على دالة التحويل التي تصف السلوك الميكانيكي للمحرك كما يلي:

$$T_a(s) = K_m I_a(s) = J s \omega_m(s) + B_m \omega_m(s) + T_L(s) \quad (10.45)$$

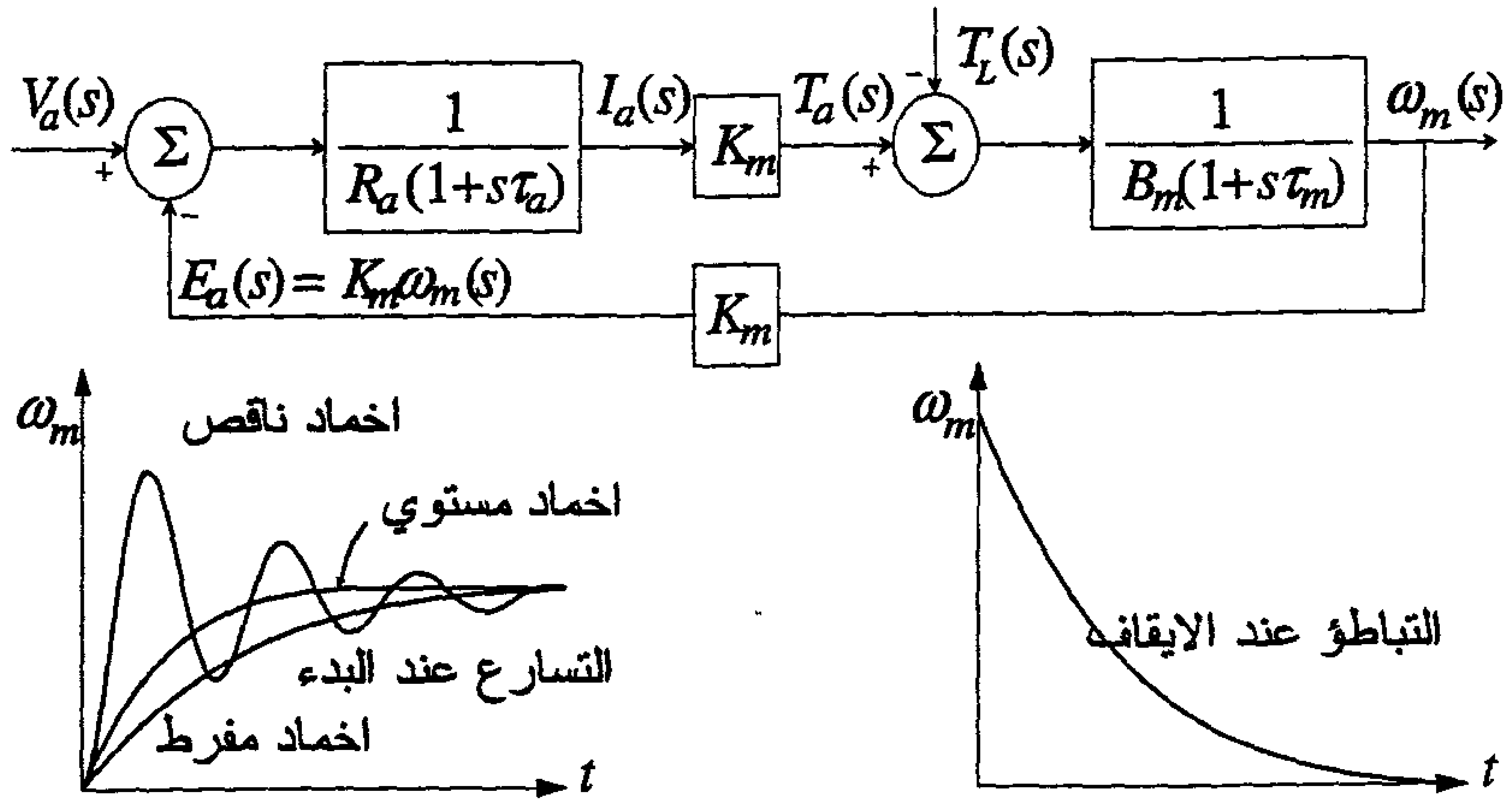
$$\omega_m(s) = \frac{T_a(s) - T_L(s)}{B_m + Js} = \frac{K_m I_a(s) - T_L(s)}{B_m (1 + s\tau_m)} \quad (10.46)$$

$\tau_m = J / B_m =$ الثابت الزمني الميكانيكي للنظام (10.47)

ويمكن من المعادلتين (10.37) و (10.41) التعبير دالة تحويل التيار بدلالة ق.د.ك المنتج وسرعة دوران المحرك كما يلي:

$$I_a(s)=\frac{V_a(s)-E_a(s)}{R_a(1+s\tau_a)}=\frac{V_a(s)-K_m\omega_m(s)}{R_a(1+s\tau_a)} \qquad (10.48)$$

ويبين الشكل (6) مخطط كتل نظام التحكم في سرعة المحرك بواسطة جهد الاطراف كما تحدده دوال المعادلتين (10.46)، (10.48).



شكل (6) مخطط كتل واستجابة المحرك منفصل الاثارة.

واذا كان عزم الحمولة T_L يتناسب طردياً مع السرعة ω_m وعامل التناسب B_L يمكن بالتعويض في المعادلة (10.45) ايجاد ان:

$$T_L \propto \omega_m \Rightarrow T_L = B_L\omega_m \qquad (10.49)$$

$$T_a(s) = K_m I_a(s) = J s\omega_m(s) + B_m\omega_m(s) + B_L\omega_m(s) \qquad (10.50)$$

$$T_a(s) = K_m I_a(s) = J s\omega_m(s) + B\omega_m(s) \qquad (10.51)$$

$$T_a(s) = K_m I_a(s) = B(1+ s\tau_m)\omega_m(s) \qquad (10.52)$$

$$J = J_m + J_L , \qquad B = B_m + B_L \qquad (10.53)$$

$\tau_m = J / B =$ الثابت الزمني الميكانيكي لحالة (10.54)

حيث J عزم القصور الكلي للمحرك والحمولة و B عامل الاخماد الكلي للمحرك والحمولة حيث يلاحظ ان الحمولة التي تتناسب طردياً مع السرعة تزيد من اخماد النظام الميكانيكي. ويمكن بالتعويض عن تيار المنتج من المعادلة (10.52) في المعادلة (10.40) الحصول على دالة التحويل التي تحدد العلاقة بين السرعة وجهد المنتج كما يلي:

$$V_a(s) = K_m \omega_m(s) + B R_a(1+ s\tau_m)(1 + s\tau_a)\omega_m(s) / K_m \qquad (10.55)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{K_m + B R_a(1+s\tau_m)(1+s\tau_a)/K_m} \qquad (10.56)$$

وعند حدوث تغير خطوة في جهد اطراف المنتج تشير المعادلة (10.56) الى ان استجابة النظام تكون من الدرجة الثانية لوجود ثابتين زمنيين τ_m و τ_a حيث تكون الاستجابة ناقصة او حرجة او مفرطة الاخماد حسب الثابتين الزمنيين والمعاملات K_m و B و R_a وكما في الشكل (6). ولدراسة سلوك النظام يمكن باعادة ترتيب المعادلة (10.56) والتعويض عن الدخل بصفر التعبير عن معادلة خصائص النظام كدالة في λ وايجاد قيم λ المحتملة والتي تمثل القيم الذاتية للنظام وكما يلي:

$$V_a(s) = \{K_m + BR_a(1 + s\tau_a)(1 + s\tau_m)/K_m\}\,\omega_m(s) = 0 \qquad (10.57)$$

$$\lambda^2 + (1/\tau_a + 1/\tau_m)\,\lambda + (1 + K_m/BR_a) / (\tau_a\tau_m) = 0 \qquad (10.58)$$

وتحدد قيم λ نمط الاستجابة حيث تشير القيم الذاتية الحقيقية الى استجابة غير متذبذبة وتشير القيم المركبة الى انماط متذبذبة. ويجب للوصول الى حالة مستقرة ان تكون اشارة الحد الحقيقي للقيم المركبة سالبة، بينما يحدد مقدار الحد التخيلي مدى الذبذبة. وعادة ما يعبر عن استجابة ومعادلة الخصائص للنظام ذو الرتبة الثانية وجذورها المركبة في الصيغة العامة التالية:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2 = 0 \tag{10.59}$$

$$\lambda = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)} \tag{10.60}$$

$$f_n = \omega_n/2\pi = f/\sqrt{(1-\zeta^2)} \tag{10.61}$$

حيث تمثل f التردد الفعلي و f_n التردد الطبيعي و ζ نسبة الاخماد ويكون الاخماد ناقص اذا كانت $\zeta <1$ وزائد اذا كانت $\zeta >1$ وحرج اذا كانت $\zeta = 1$. ووفقا" لقيم معاملات النظام يمكن من المعادلتين (58) و (59) التعبير عن التردد الطبيعي ونسبة الاخماد لاستجابة النظام للحكم على نمط سلوكه كما يلي:

$$\omega_n = \sqrt{\{(1 + K_m/BR_a)/(\tau_a\tau_m)\}}\ ,\ f_n = \omega_n/2\pi \tag{10.62}$$

$$\zeta = (1/\tau_a + 1/\tau_m)/(2\omega_n) \tag{10.63}$$

ووفقاً لقيم بعض المعاملات الاساسية للنظام يمكن تحديد بعض الحالات الخاصة لاستجابة النظام كما يلي:

الحالة 1) عند اهمال محاثة دائرة المنتج:

باهمال محاثة المنتج $L_a=0$ تبين المعادلة (10.41) ان الثابت الزمني للمنتج يكون صفراً $\tau_a=0$ لتصبح دالة تحويل المعادلة (10.56):

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)}=\frac{1}{K_m+BR_a(1+s\tau_m)/K_m}=\frac{K'_m}{1+s\tau'_m} \qquad (10.64)$$

$$K'_m=\frac{K_m}{K_m^2+BR_a}, \qquad \tau'_m=\frac{BR_a\tau_m}{K_m^2+BR_a}<\tau_m \quad (10.65)$$

الحالة 2) عند اهمال اخماد المحرك والحمولة:

باهمال اخماد النظام $B=0$ يمكن بتعديل المعادلة (10.51) والتعويض في المعادلة (40.10) الحصول على دالة التحويل كما يلي:

$$K_m I_a(s) = J s\omega_m(s) \qquad (10.66)$$

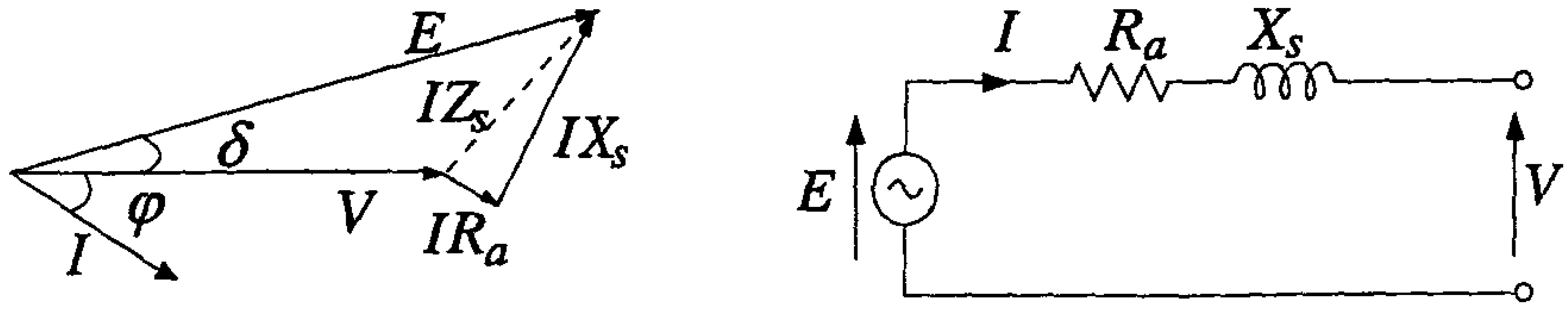
$$V_a(s) = \{K_m\omega_m(s) + JR_a s(1 + s\tau_a)\omega_m(s)\} / K_m \qquad (10.67)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)}=\frac{1}{K_m+JR_a s(1+s\tau_a)/K_m} \qquad (10.68)$$

3.10. سلوك الآلات التزامنية.

تمثل الآلات التزامنية احد اهم عناصر نظم القوى حيث يحدد سلوكها العابر والديناميكي مدى بقاء تزامنها مع النظام بعد تعرضها لاضطراب ما. وتعد دراسة هذه الاضطرابات وسلوك الآلة الدقيق غاية في التعقيد وهو يرتبط بدراسات الاستقرارية. ومن ابسط الحالات التي يمكن من خلالها التعرف على سلوك الآلة حالة القصر الفجائي على الاطراف والتغير الفجائي في الحمولة. وينتج المولد التزامني توليد قدرة

فعالـة P محـددة بجهـد محـدد V وتـردد محـدد F ويمـكـن ان ينـتـج او يسـتهلك قـدرة متفاعلـة Q وفقـاً لمسـتوى الاثـارة. ويضـم محـيط الـدوار لفـائف اخمـاد علـى شـكل قضـبان نحاسـية مقصـورة نهايتهـا بحلقـات طرفية لاخماد تذبـذبات السـرعة بانتـاج عـزوم كهرومغنـاطيسـية مضـادة للتغيرات. وفي الحـالة الثابتة المتزنـة تـؤدي محصلة فيض ق.د.م المجـال ورد فعل المنتج في التغـرة الهوائيـة الى احثـات ق.د.ك المولـد E. وبتحميل المولـد اسـطواني الـدوار يتـدفق تيـار الحمـل I في مقاومـة المنـتج R_a والمفاعلـة التزامنيـة X_s التي تشمل مفاعلة التسرب X_l ومفاعلـة رد فعـل المنـتج X_a. ويمـكـن نمذجـة المولـد التـزامني اسـطواني الـدوار بالـدائرة المكافئـة والمخطط الطوري المبين في الشـكل (7) حيـث يمـكـن كتابـة معـادلات الاداء التالية لـكل طور للمولد:



شـكل (7) تمثيل المولد التزامني.

$$S = P + jQ = VI^* = V\angle 0\ [(E\angle\delta - V\angle 0) / Z_S\angle\theta]^* = (VE/Z_S)\angle(\theta - \delta) - (V^2/Z_S)\angle\theta$$

$$P = (VE/Z_S)\cos(\theta - \delta) - (V^2/Z_S)\cos\theta \qquad (10.69)$$

$$Q = (VE/Z_S)\sin(\theta - \delta) - (V^2/Z_S)\sin\theta \qquad (10.70)$$

وتعـرف الزاويـة δ بزاويـة الـدوار أو الحمـل او العـزم او زاويـة القـدرة للمولـد. وفي المولـدات الكـبيرة عـادة مـا تكـون $X_S >> R_a$ ولـذلك غالبـاً ماتهمل مقاومـة المنتج ممـا يجعـل $Z_S \approx X_S$ و $\theta \approx 90°$

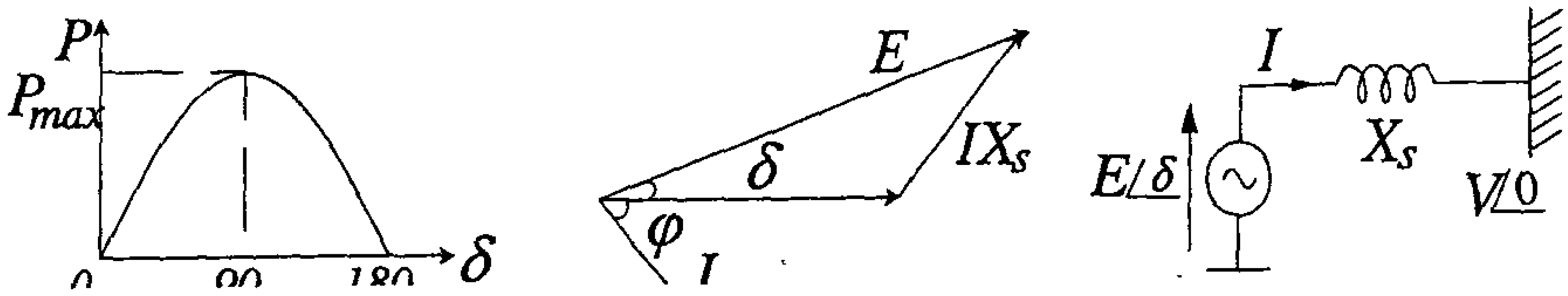
وبالتالي يمكن تبسيط المعادلتين (69.10) و (70.10) كما يلي:

$$P = (VE/X_S) \sin \delta \qquad (10.71)$$

$$Q = (VE/X_S) \cos \delta - V^2/X_S \qquad (10.72)$$

وعند ثبوت الجهد V و ق.د.ك E تبين المعادلة (71.10) ان القدرة الفعالة P تعتمد على زواية القدرة δ حيث E تسبق V وتكون P موجبة لقيم δ الموجبة وتعمل الآلة كمولد، وتكون P سالبة عندما تكون δ سالبة حيث V تسبق E وتعمل الآلة كمحرك. وتبين المعادلة (10.72) ان تدفق القدرة المتفاعلة يتحدد اساساً بمقدار ق.د.ك حيث تكون Q موجبة اذا كانت $(E \cos \delta > V)$ وعندها يعمل المولد كمكثف ينتج قدرة متفاعلة ويكون مفرط الاثارة، وتكون Q سالبة اذا كانت $(E \cos \delta < V)$ ويعمل المولد كملف يستهلك قدرة متفاعلة ويكون ناقص الاثارة، ويكوk المولد مستوي الاثارة اذا كانت $(E \cos \delta = V)$ وتكون $Q=0$.

ويمكن دراسة اداء مولد متصل بقضيب لانهائي بنمذجته بمصدر جهد تمثله ق.د.ك المنتج E على التوالى مع المفاعلة التزامنية X_S مع اهمال مقاومة المنتج وكما في الشكل (8) حيث يكون التردد وجهد الاطراف V ثابتين وزاوية القدرة δ تعتمد على القدرة الداخلة للمولد اكثر من اعتمادها على حمولته. وبتغيير قدرة المحرك الاولي ومن ثم تغيير δ يمكن تحميل المولد بالقدر المطلوب ضمن الحدود الاقتصادية والتقنية. وبثبوت E و V يمكن الحصول على القدرة المولدة من المعادلة (71) كما يلي:



شكل (8) مولد تزامني متصل بقضيب لانهائي.

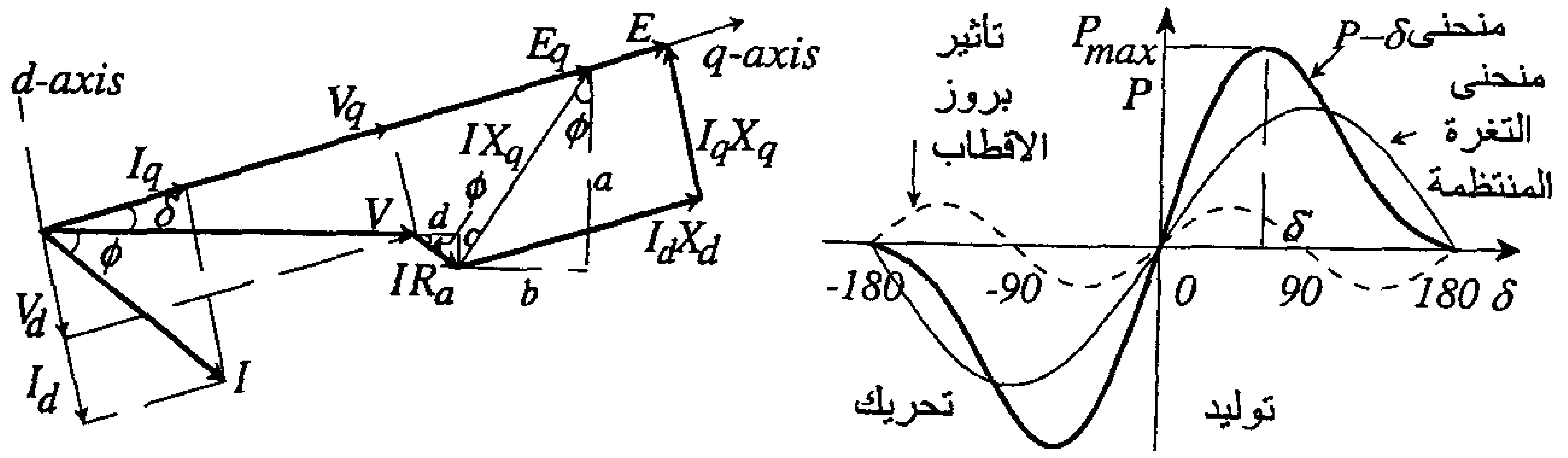
$$P = P_{max} \sin \delta \ , P_{max} = VE/X_s \qquad (10.73)$$

ويبين الشكل (8) منحنى القدرة- الزاوية الذي يمثل المعادلة (10.9) حيث تزداد القدرة الخارجة P مع زيادة δ الى غاية الذروة P_{max} التي تحدث عند $\delta = 90^\circ$ وتسمى بحد استقرارية الحالة الثابتة للآلة. وعند $\delta > 90^\circ$ ستتناقص P وتصبح الآلة غير مستقرة. واذا كان التغير في δ كبير وفجائي فإن حد الاستقرارية سيكون اقل من حد استقرارية الحالة الثابتة حيث قد يتأرجح الدوار الى ما بعد 90° قبل تلاشى التذبذبات مما يفقد الآلة استقرارها وتزامنها.

3.10 .1 المولد التزامني ذو الاقطاب البارزة.

تنشئ مركبة ق.د.م الجيبية الاساسية لرد فعل المنتج فيض مغناطيسي جيبي عند تسليطها على تغرة هوائية منتظمة كما في الآلات اسطوانية الدوار في الحالة الثابتة اذا ما اهمل تأثير الاسنان والشقوب المحفورة في سطح الدوار. ولكن الامر غير ذلك عند عدم انتظام التغرة الهوائية كما في الآلات بارزة الاقطاب. وتحل المشكلة في هذه الحالات بتطبق نظرية المحورين حيث يتم تحليل ق.د.م رد فعل المنتج الى مركبتين هما F_d التي تعمل على طول محور القطب او المحور المباشر (d-axis) وتضاد ق.د.م المجال F_f، و F_q التي تعمل على طور المحور بين الاقطاب او المحور المتعامد *q-axis* وتسبق F_d بتسعون درجة.

ويقود تحليل ق.د.م رد فعل المنتج الى F_d و F_q الى تحليل تيار المنتج I الى مركبة المحور المباشر I_d التي تنتج F_d، ومركبة المحور المتعامد I_q التي تنتج F_q. ويلاحظ ان محور اسناد I_d و I_q هو متجه ق.د.ك المنتج $q\text{-}axis$ بينما يمثل متجه الجهد محور اسناد المركبتين الفعالة والمتفاعلة للتيار الطوري. وعملياً يؤخذ تأثير مركبتي رد فعل المنتج في الحسبان بتحليل مفاعلة رد فعل المنتج X_a الى X_{ad} على المحور المباشر و X_{aq} على المحور المتعامد. ويقود ذلك الى تحليل المفاعلة التزامنية X_s الى مفاعلة المحور المباشر X_d ومفاعلة المحور المتعامد X_q حيث $X_d = X_l + X_{ad}$ و $X_q = X_l + X_{aq}$ مع ملاحظة ان $X_d > X_q$. وعليه يمكن في الحالة الثابتة نمذجة الآلة التزامنية بارزة الاقطاب بمصدر تمثله ق.د.ك المجال E على التوالي مع مقاومة المنتج R_a ومركبتي المفاعلة التزامنية X_d و X_q كما في المخطط الطوري المبين في الشكل (9).



شكل (9) المخطط الطوري للمولد التزامني ذو الاقطاب البارزة.

ويتطلب حساب المركبات المباشرة والمتعامدة للتيار والجهد معرفة الزاويتين δ و ϕ بينما عادة ما تكون الزاوية ϕ فقط معلومة. ويمكن من المخطط الطوري المبين في الشكل (9) حساب δ ومن تم كميات المحاور المباشر والمتعامد والقدرة كما يلي:

$\tan\delta = (a - c) / (V+d+b)= (I X_q \cos\phi - I R_a \sin\phi) / (V + I R_a \cos\phi + I X_q \sin\phi)$

$\delta = \tan^{-1}[(I X_q \cos\phi - I R_a \sin\phi) / (V + I R_a \cos\phi + I X_q \sin\phi)]$ (10.74)

$V_q = V\cos\delta, \quad V_d = V\sin\delta$ (10.75)

$I_q = I\cos(\phi+\delta), \quad I_d = I\sin(\phi+\delta)$ (10.76)

$\mathbf{E} = \mathbf{V} + \mathbf{I} R_a + j\mathbf{I}_d X_d + j\mathbf{I}_q X_q$ (10.77)

$S = V I 1 0 = (V_d + jV_q)(I_d - jI_q)$ (10.78)

وعنـد اهمـال مقاومـة المنـتج Ra يمكـن مـن المخطـط الطـوري المبين في الشكل (9) ومن المعادلات (75.10) الى (78.10) التعبير عن القدرة الفعالة والمتفاعلة الخارجة من المولد ذو الاقطاب البارزة ومن تم منحنى القدرة- الزاوية المبين في الشكل (8) كما يلي:

$I_q = [V_d + R_a I\sin(\phi+\delta)] / X_q \approx V_d / X_q = V\sin\delta / X_q$ (10.79)

$I_d = [E - V_q - R_a I\cos(\phi+\delta)] / X_d \approx (E - V_q) / X_d = (E - V\cos\delta) / X_d$ (10.80)

$P = V_d I_d + V_q I_q \approx (V\sin\delta)(E - V\cos\delta) / X_d + (V\cos\delta)(V\sin\delta) / X_q$

$= (VE/X_d)\sin\delta + (V^2/2)(1/X_q - 1/X_d)\sin 2\delta$

(10.81)

$Q = V_q I_d - V_d I_q \approx (V\cos\delta)(E - V\cos\delta) / X_d - (V\sin\delta)(V\sin\delta) / X_q$

$$= (VE/X_d) \cos \delta - V^2(\sin^2\delta / X_q + \cos^2\delta/X_d) \quad (10.82)$$

2.3.10. انظمة التحكم في المولد وخريطة التشغيل.

يلحق بوحدات التوليد اثنان من انظمة التحكم الذاتي التي يجب اخذ تأثيرها في الحسبان عند دراسة اداء المولد في الحالة العابرة وهما نظام الاثارة الذي يمثل منظم الجهد الذاتي اهم اجزاءه ونظام التحكم في السرعة الذي يمثل حاكم السرعة اهم اجزاءه. وبزيادة انتاج القدرة المتفاعلة يرتفع تيار المولد وهبوط الجهد في معاوقته التزامنية وينخفض جهد اطرافه وهو ما يتطلب رفع مستوى الاثارة لزيادة ق.د.ك المنتج. ويتولى نظام الاثارة التحكم في جهد الاطراف وتدفق القدرة المتفاعلة حيث يساهم منظم الجهد السريع فى استقرارية المولد برفع حد الاستقرارية الثابتة برفع ق.د.ك ومن تم القدرة الفعالة العظمى طبقاً للمعادلة (10.71).

وتتسبب زيادة انتاج القدرة الفعالة بزيادة العزم الكهربائي على عمود دوران المولد والاخلال بالاتزان الميكانيكي مما يؤدي الى هبوط السرعة والتردد. ويستمر الهبوط في تردد النظام بزيادة الطلب على القدرة الفعالة الى يقوم نظام التحكم في السرعة برفع قدرة المحرك الاولى وزيادة العزم الميكانيكي لموائمة العزم الكهربائي لضبط تردد النظام وتدفق القدرة الفعالة. ويعد نظام التحكم في السرعة اقل تأثيراً على السلوك العابر للنظام بسبب انخفاض سرعة استجابته للاضطرابات مقارنة بنظام الاثارة. ويتطلب التشغيل الاعتيادي المستقر للمولدات التزامنية في الحالة الثابتة مراعات الحدود التي تفرضها العوامل التالية:

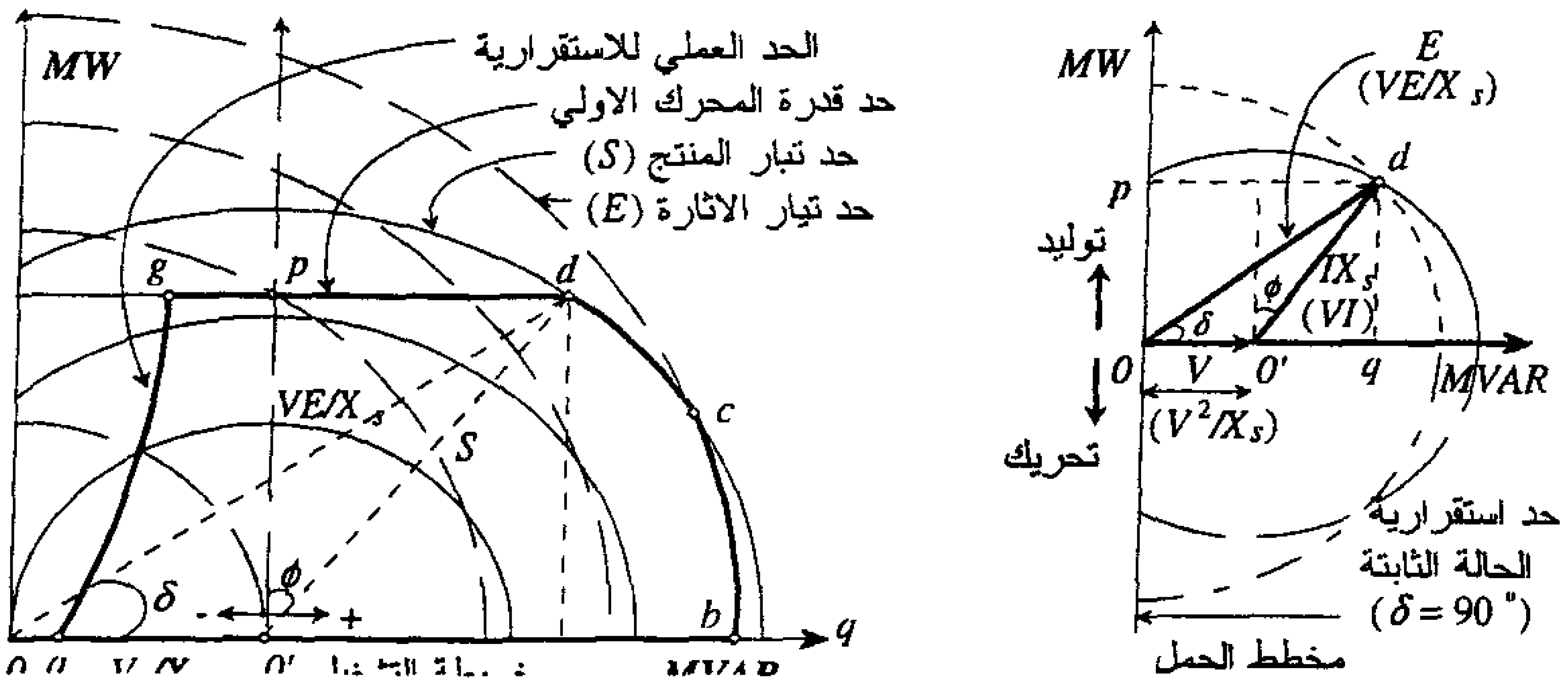
1 - الحد الاعلى لتيار المنتج وفقاً لدرجة الحرارة الآمنة للمنتج وهو يحدد ، عند ثبوت الجهد ، بمقنن المولد بالفولت امبير.

2 - الحد الاعلى لتيار الاثارة وفقاً لدرجة الحرارة الآمنة للدوار وهو بدوره يحدد الحد الاعلى لـ ق.دم المحثثة في المنتج.

3 - مقنن قدرة المحرك الاولي بالوات والذي يحدد مع معامل قدرة الحمولة الحد الاعلى للقدرة الفعالة الخارجة من المولد.

4 - حد الاستقرارية للقدرة المتفاعلة السالبة (معامل القدرة المتقدم) التي تقترب بزاوية القدرة من 90° باقل من القدر الآمن.

وعند توصيل المولد بقضيب لانهائي وتثبيت الاثارة واهمال مقاومة المنتج والتشبع تكون ق.د.ك E والجهد V ثابتين وزاوية القدرة δ المتغير الوحيد لتحديد القدرة الخارجة. ويمكن من المخطط الطوري في الشكل (7) الحصول على مخطط الحمل المبين في الشكل (10) لمولد اسطواني الدوار حيث يمثل $00'$ الجهد V و$0d$ ق.د.ك E بينما يمثل $0'd$ متجه IX_S بمركبتيه الحقيقية $0'p$ والتخيلية $0'q$. وبضرب هذه المتجهات في V/X_S ومقارنة الناتج بالمعادلتين (71.10) و (72.10) نجد ان $0'd=VI=S$ و $0d=VE/X_S=P_{max}$ و $00'=V^2/X_S=Q_{min}$ و $0'p=VI\cos\phi=P$ و $0'q=VI\sin\phi=Q$. وبرسم نقطة التشغيل d لقيم δ مختلفة مع ثبوت V و E يكون المحل الهندسي للقدرة المركبة S متغيرة دائرة نصف قطرها $0d=VE/X_S$ ومركزها النقطة 0 ذات الاحداثيات $(0\ ,\ -V^2/X_S)$ على المستوى المركب. وعند ثبوت V و I وتغير E تكون S ثابتة ومحلها الهندسي دائرة نصف قطرها $0'd=VI$ ومركزها النقطة $0'$ التي تمثل نقطة الاصل للمستوى المركب كما في الشكل (10).



شكل (10) مخطط حمل وخريطة تشغيل المولد التزامني.

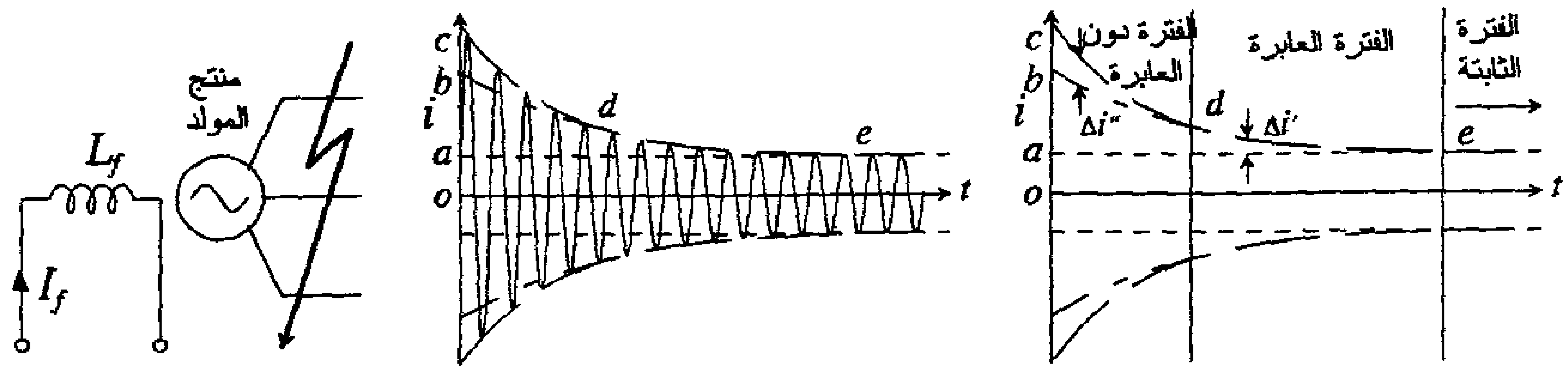
وبذلك يمثل محور P في المستوى المركب خط عمودي على المتجه V عند النقطة $0'$ ويمثل محور Q خط منطبق على المتجه V ويلتقي بمحور P عند النقطة $0'$ كما يتضح من الشكل (10). وتبعاً لمقنن قدرة المحرك الاولي يكون الحد الاعلى للقدرة P التي ينتجها المولد اقل قليلاً من قيمتها العظمى حيث يحدد ذلك خط يوازي محور Q ويقطع محور P عند نقطة p.

وتبعاً للحد العملي لاستقرارية الحالة الثابتة يكون الحد الاعلى للقدرة المتفاعلة السالبة اقل قليلاً من قيمتها النظرية عند $\delta=90°$ بحيز آمان محدد ويكون المحل الهندسي للقدرة المتفاعلة السالبة خط يمتد من نقطة a ليلتقي بخط المحل الهندسي للحد الاعلى للقدرة الفعالة العظمى عند النقطة g. ويزيد منظم الجهد المتواصل السريع من الحد الآمن للقدرة المتفاعلة السالبة ومن تم يزيد من ازاحة g الى اليسار. وباخذ جميع هذه الاعتبارات في الحسبان نحصل على خريطة التشغيل المبينه في الشكل (10) حيث تضم المنطقة $abcdga$ جميع نقاط التحميل الممكنة ومنها يمكن الحصول على جميع معاملات التشغيل في الحالة الثابتة.

3.10 .3. تأثير القصر ثلاثي الطور.

يبين الشكل (11) مولد يدور بسرعة ω_m وتيار مجاله I_f ينتج ق.د.ك تساوي الجهد بين اطراف المنتج المفتوحة E_f تعرض فجأة لقصر ثلاثي الطور متزن على اطراف المنتج المفتوحة قبل القصر. وبمجرد حدوث القصر سيتدفق تيار ضخم في دائرة المنتج يتلاشى بالنهاية مع استمرار القصر الى تيار القصر في الحالة الثابتة والذي تكون قيمته عند اهمال مقاومة المنتج:

$$I_{SC} = E_f / X_S \qquad (10.83)$$



شكل (11) قصر ثلاثي الطور اطراف المولد التزامني.

فاذا كانت $E_f = 1\ pu$ و $X_S = 1\ pu$ سيؤول تيار القصر في الحالة الثابتة الى قيمة غير خطرة $I_S = 1\ pu$ وهذه من ميزات الآلة التزامنية. ولكن تيار القصر الاولي لحظة القصر قد يصل الى قيم ضخمة تبلغ $5\ pu$ الى $10\ pu$. وفي الحالة الثابتة قبل القصر تكون تشابكات فيوض لفائف المجال ثابتة ولايسري فيها سوى تيار الاثارة المستمر وتكون لفائف الاخماد هامدة ولايسري فيها التيار لكونها تدور بنفس سرعة الدوار. وبمجرد حدوث القصر يتدفق تيار المنتج الذي ينتج ق.د.م تضاد ق.د.م لفائف المجال وتتغير تشابكات فيوض كل من لفائف المنتج والمجال ولفائف الاخماد. و ولعدم امكانية تغير مركبات الفيض عن قيمها الابتدائية فوراً تتدفق مركبات تيار محتثة (ناتجة عن

ق.د.ك المحتثة بسبب تغير تشابكات الفيوض) في كل من لفائف المجال والاخماد. واذا كانت الآلة لاتضم مثل هذه اللفائف كما هو الحال في آلات الدوار الاسطواني احياناً فإن التيارات العابرة المحتثة مباشرةً في حديد المنتج تنتج تقريباً نفس تأثير تيار لفائف الاخماد.

ويبين الشكل (11) الشكل الموجي لتيار القصر الناتج عن قصر ثلاثي الطور متزن عند اطراف المولد حيث يبين الشكل مركبة التردد الاساسي فقط. ويلاحظ ان الشكل الموجي للتيار ينقسم الى ثلاثة مراحل زمنية مميزة هي المرحلة دون العابرة **(subtransient)** وتستمر لبضع دورات فقط يضمحل خلالها التيار بمعدل سريع جداً، والمرحلة العابرة (transient) وتمتد لعدة ثواني يستمر خلالها تناقص التيار بمعدل ابطاء، واخيراً مرحلة الحالة الثابتة **(steady-state)** التي يبقى خلالها مقدار التيار ثابتاً وكما تحدده المعادلة (10.83). ويمثل فرق التيار $\Delta i'$ الفرق بين غلاف تيار الفترة العابرة وتيار الفترة الثابتة، وويمثل فرق التيار $\Delta i''$ الفرق بين غلاف تيار الفترة دون العابرة وامتداد غلاف تيار الفترة العابرة وكلاهما يتلاشيان كدالة اسية.

وخلال الفترة دون العابرة حيث تضاد ق.د.م رد فعل المنتج الناتجة عن تيار المنتج ق.د.م المجال وتعمل على اضعاف المغنطة سيتدفق تيار حثي كبير في لفائف الاخماد ولفائف المجال للحفاظ على ثبوت فيض ما قبل القصر. ويكافئ تأثير ذلك عملياً زيادة ضخمة في تيار الاثارة مما يؤدي الى زيادة ضخمة في ق.د.ك المنتج ومن تم ضخامة تيار القصر خلال الفترة دون العابرة. ولكن التيارات المحتثة في لفائف الاخماد تتلاشى سريعاً بسبب صغر مقاومة دوائرها وصغر ثوابتها الزمنية. وبذلك تحدد سلوك تيار المنتج في الفترة دون العابرة اساساً بتيار لفائف الاخماد.

وبنهاية الفترة دون العابرة يكون تيار لفائف الاخماد قد تلاشى الى الصفر وبدلك سيحدد سلوك تيار المنتج في الفترة العابرة اساساً بتيارلفائف المجال الذي يتلاشى بثابت زمني كبير. وبتلاشي التيار العابر في لفائف المجال سيحدد تيار المنتج في الفترة الثابتة المستمر تيار الاثارة المستمر فقط.

وتنتج جميع اللفائف اثناء القصر مركبات ق.د.م تعمل على المحور المباشر حيث يمكن معرفة سلوك تيار المنتج خلال فترات القصر المختلفة باستخدام مفاعلات وثوابت زمنية مناسبة للمحور المباشر يمكن التعبير عنها بالعودة الى الشكل (10) كما يلي:

$X_d = \sqrt{2}Ef/oa =$ المفاعلة التزامنية للمحور المباشر (10.84)

$X_d' = \sqrt{2}Ef/ob =$ المفاعلة العابرة للمحور المباشر (10.85)

$X_d'' = \sqrt{2}Ef/oc =$ المفاعلة دون العابرة للمحور المباشر

(10.86)

$$i_{sc} = (i + i' + i'')\sin\omega t = (I + I'e^{-t/\tau_d'} + I''e^{-t/\tau_d''})\sin\omega t$$

(10.87)

$$i_{sc} = \sqrt{2}\left[\frac{E_f}{X_d} + \left(\frac{E_f}{X_d'} - \frac{E_f}{X_d}\right)e^{-t/\tau_{d0}'} + \left(\frac{E_f}{X_d''} - \frac{E_f}{X_d'}\right)e^{-t/\tau_{d0}''}\right]\sin\omega t$$

(10.88)

حيث $\tau''d0$ الثابت الزمني للفترة دون العابرة ويحدد تلاشي غلافها ، و $\tau'd0$ الثابت الزمني للفترة العابرة ويحدد تلاشي غلافها.

3.3.10 1. مركبة التيار المستمر في تيار القصر.

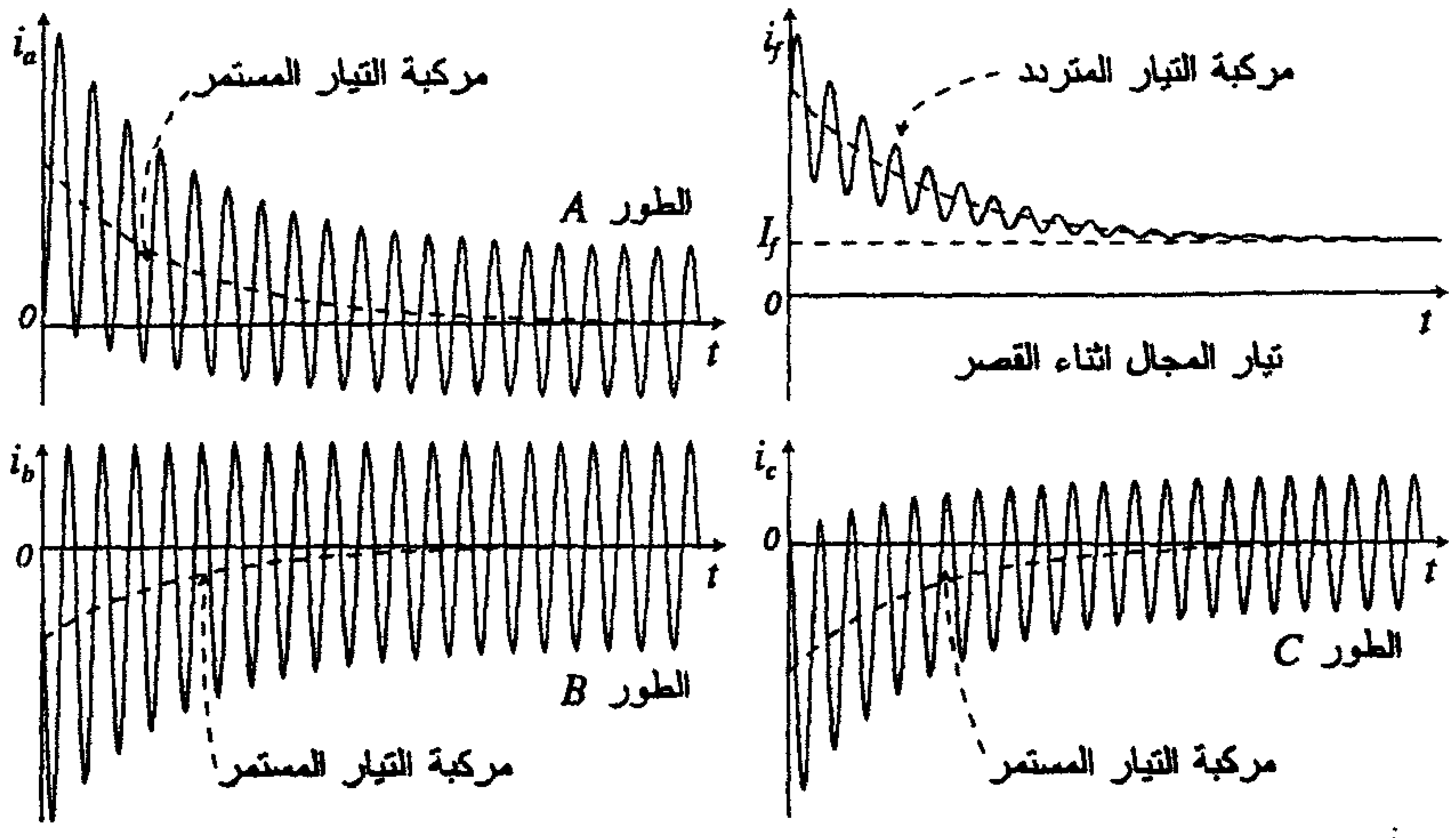
تمثل الموجة المتجانسة المبينة في الشكل (❖) حالة خاصة مبسطة لتيار القصر ثلاثي الطور على انه دائم الاتزان. وعملياً تكون تيارات القصر في الاطوار الثلاثة غير متجانسة حول محور الصفر للتيار وتحتوي على مركبة تيار مستمر تم اهمالها في موجة الشكل (11). وتعود مركبة التيار المستمر الى تغير تشابك الفيض مع لفائف الاطوار لحظة حدوث القصر. فاذا كان تشابك الفيض صفراً لحظة القصر لا توجد حاجة لهذه المركبة للحفاظ على تشابك الفيض عند الصفر وتكون موجة تيار القصر لهذا الطور متجانسة. وفي المقابل اذا كان تشابك الفيض لايساوي الصفر لحظة القصر يجب ان تبرز مركبة التيار المستمر للحفاظ على ثبوت تشابك الفيض حيث تتلاشى مركبة التيار المستمر وفقاً للثابت الزمني لدائرة المنتج. ويبن الشكل (12) تأثير مركبة التيار المستمر في موجة تيار القصر في الاطوار الثلاثة حيث يمكن التعبير عن هذه المركبة وتيار القصر وكما يلي:

$$i_{dc} = I_{dc0}\, e^{-t/\tau_a} \qquad (10.89)$$

$$i_{sc} = \sqrt{2}\left[\frac{E_f}{X_d} + \left(\frac{E_f}{X'_d} - \frac{E_f}{X_d}\right)e^{-t/\tau'_{d0}} + \left(\frac{E_f}{X''_d} - \frac{E_f}{X'_d}\right)e^{-t/\tau''_{d0}}\right]\sin\omega t + I_{dc0}\, e^{-t/\tau_a} \qquad (10.90)$$

وتحدث اكبر مركبة تيار مستمر في تيار القصر في الطور الذي يكون تشابك فيضه في ذروته لحظة حدوث القصر وتساوي القيمة العظمى لتيار الفترة دون العابر لحظة الصفر. وتنشئ مركبة التيار المستمر في لفائف المنتج مركبة فيض ساكنة في الثغرة الهوائية تؤدي بدورها الى احتثات جهد وتدفق مركبة تيار متردد عند التردد الاساسي

في لفائف المجال الدائرة بسرعة التزامن في الثغرة. ويبين الشكل (12) مركبة التيار المتردد العابرة في تيار المجال فور حدوث قصر على اطراف المنتج.



شكل (12) الشكل الموجي لتيارات الاطوار والمجال اثناء القصر.

2. 3.3.10 تيار القصر في المولد المحمّل.

يعد تحليل سلوك المولد المحمل اعتيادياً عند تعرضه لقصر ثلاثي الطور على اطرافه غاية في التعقيد حيث يمر تيار القصر بالفترة دون العابرة والعابرة ليستقر اخيراً عند القيمة الثابتة وتتغير مفاعلة المولد عند حدوث القصر من X_d الى X_d'' كما تتغير ق.د.ك المنتج للحفاظ على ثبوت تشابكات الفيض. ويمكن في هذه الحالة نمذجة المولد بمصدر ق.د.ك مناسبة خلف مفاعلة مناسبة لكل فترة حيث يمكن تقريبياً التعبير عن ق.د.ك وتيار القصر للمولد المحمّل وثوابته الزمنية كما يلي:

$$E_i = V_a + jI_a X_d = \text{ق.د.ك الحالة الثابتة} \qquad (10.91)$$

$$E'_i = V_a + jI_a X'_d = \text{ق.د.ك الحالة العابرة} \qquad (10.92)$$

$$E''_i = V_a + jI_a X''_d = \text{ق.د.ك الحالة دون العابرة} \quad (10.93)$$

$$i_{sc} = \sqrt{2}\left[\frac{E}{X_d} + \left(\frac{E'}{X'_d} - \frac{E}{X_d}\right)e^{-t/\tau'_d} + \left(\frac{E''}{X''_d} - \frac{E'}{X'_d}\right)e^{-t/\tau''_d}\right]\sin\omega t + I_{dc0}\, e^{-t/\tau_a} \quad (10.94)$$

$$\tau'_d = (X_d'/X_d)\tau'_{d0}\,, \quad \tau''_d = (X_d''/X_d')\tau''_{d0} \quad (10.95)$$

3.10 4معادلة حركة الآلة التزامنية.

تكتسب معادلات عزم القصور الذاتي التي تصف تأثير عدم التوازن بين العزوم او القدرات الميكانيكية والعزوم او القدرات الكهربائية المؤثرة على عمود ادرة الآلة اهمية قصوى في تحليل السلوك الديناميكي للآلة التزامني. ومن المفيد قبل اشتقاق معادلات الحركة للآلة مراجعة واستعراض الكميات والعلاقات المرتبطة بميكانيكا الحركة الدورانية للكتلة الدوارة واوجه التناظر بينهما وبين الحركة الخطية الاقرب الى الفهم والتصور. ووفقاً لذلك يمكن من مبادئ الميكانيكا تلخيص تعريفات هذه الكميات والعلاقات ووحداتها كما في الجدول التالي:

الكمية	الرمز	الوحدة	الكمية	الرمز	الوحدة
الحركة الخطية			الحركة الدورانية		
المسافة (distance)	S	m	الازاحة الزاوية	θ	rad
السرعة (velocity)	$v=ds/dt$	m/s	السرعة الزاوية	$\omega = d\theta/dt$	rad/s
التسارع (acceleration)	$a=dv/dt$	m/s2	التسارع الزاوي	$\alpha = d\omega/dt$	rad/s2

الحركة الخطية			الحركة الدورانية		
الكمية	الرمز	الوحدة	الكمية	الرمز	الوحدة
الكتلة (mass)	M	kg	عزم القصور (inertia)	$J=\int r^2 dm$	kg.m^2
القوة (force)	$F=ma$	N	العزم (torque)	$T = J\alpha$	Nm
الشغل (work)	$W=\int F ds=Fs$	J	الشغل	$W=\int T d\theta=J\theta$	J
القدرة (power)	$P=dW/dt=Fv$	W	القدرة	$P=dW/dt=T\omega$	W
كمية الحركة (momentum)	$M = mv=P/a$	J.s/m	كمية الحركة	$M=J\omega=P/\alpha$	Js/rad
الطاقة الحركية (energy)	$W_k = \frac{1}{2}mv^2$	J	الطاقة الحركية	$W_k = \frac{1}{2}J\omega^2$	J

ونظراً لكون الازاحة الزاوية θ تقاس نسبة الى محور اسناد ثابت فهي تعد مقياس مطلق لزاوية الدوار وتزداد قيمتها بشكل متواصل مع الزمن. وبما ان الاهتمام ينصب على معرفة سرعة الدوار نسبة الى سرعة التزامن فإنه من المفيد التعبير عن ازاحة الدوار نسبة الى محور اسناد يدور بسرعة التزامن الثابتة حيث تشير زاوية الدوار (زاوية القدرة) δ الى هذه الازاحة. وبذلك يمكن التعبير عن الازاحة الزاوية θ عند الزمن t ومن تم السرعة الزاوية ω والتسارع الزاوي α بدلالة δ كما يلي:

$$\theta = \omega_S t + \delta$$

$$\omega = d\theta/dt = \omega_s + d\delta/dt$$

$$\alpha = d\omega/dt = d^2\theta/dt^2 = d^2\delta/dt^2 \qquad (10.96)$$

وفي حالة عدم توازن العزوم المؤثرة على دوار الآلة يكون صافي عزم التسارع (او التباطؤ) T_a عبارة عن الفارق بين العزم الميكانيكي T_m الداخل للمولد والذي يبدله المحرك الاولى والعزم الكهرومغناطيسي (او الكهربائي) T_e الخارج والناتج عن تأثير القوى الكهرومغناطيسية على موصلات لفائف الدوار). ويمكن من الجدول السابق والمعادلة (10.69) التعبير مبدئياً عن معادلة الحركة بدلالة عزم التسارع T_a وعزم القصور J للكتلة الدوارة التي تضم المولد والمحرك الاولي كما يلي:

$$T_a = T_m - T_e$$

$$J\alpha = J\, d\omega/dt = T_a$$

$$J\, d^2\delta/dt^2 = T_m - T_e \quad \text{(Nm)} \qquad (10.97)$$

وعادة ما يفضل التعامل مع القدرة الميكانيكية الداخلة والقدرة الكهربائية الخارجة للمولد بدلاً من العزوم الداخلة والخارجة. وفي هذه الحالة يمكن التعبير عن المعادلة (10.97) بدلالة القدرة بضرب طرفي المعادلة في ω وملاحظة العلاقة بين عزم القصور J وكمية الحركة M بوحدة MJs/rad والعلاقة بين العزم T والقدرة P بوحدة MW من الجدول السابق كما يلي:

$$J\omega\, d^2\delta/dt^2 = T_m\omega - T_e\omega$$

$$M\, d^2\delta/dt^2 = P_m - P_e \quad \text{(MW)} \qquad (10.98)$$

ويجب التأكد من اتباع نفس السياق في التعبير عن الوحدات الزاوية المستخدمة في المعادلتين (10.97) و (10.98) حيث يجب ان تكون جميعاً في صيغة درجات او نصف قطرية وأن تكون جميعاً ميكانيكية أو كهربائية مع عدم الخلط بينها. وقد تم في المعادلات السابقة استخدام وحدات زاوية نصف قطرية ميكانيكية (لاحظ ان $\theta_e = p\theta_m$ ، حيث p عدد ازواج الاقطاب).

وفي بعض الاحيان تعطي شركات تصنيع الآلات عزم القصور في الصيغة WR^2 بالوحدات الانجليزية والتي تساوي حاصل ضرب وزن الكتلة الدوارة لوحدة التوليد بالرطل في مربع نصف قطر الحركة التدويمية (gyration) بالقدم. وعملياً تتفاوت قيمة عزم القصور J وكمية الحركة M بشكل كبير وفقاً لمقنن الآلة كما يصعب قياسهما وتعيينها بشكل مباشر. ولذلك عادة مايعبر عن كمية الحركة للمولد بدلالة ثابت القصور H الذي يمثل الطاقة الحركية المخزونة في الآلة بوحدة MJ كنسبة من مقنن قدرتها S بوحدة MVA. وبذلك نجد مما سبق ان:

$$J = WR^2/23.745 \quad (\text{kg.m}^2)$$

$$W_k = \tfrac{1}{2}J\omega_s^2 = \tfrac{1}{2}M\omega_s \;, \quad H = W_k/S \quad (\text{MJ/MVA})$$

$$H = \tfrac{1}{2}J\omega_s^2/S = (WR^2)\omega_s^2/(47.49S) \quad (\text{MJ/MVA})$$

$$H = \tfrac{1}{2}M\omega_s/S \;, \quad M = 2HS/\omega_s \quad (\text{MJ/rad}) \; (10.99)$$

وبالتعويض عن M من المعادلة (10.99) وقسمة الطرفين على مقنن الآلة S بوحدة MVA يمكن التعبير عن معادلة الحركة (10.98) والتي تعرف بمعادلة التأرجح (swing equation) في

الصيغة الواحدية (pu) والزوايا الكهربائية كما يلي:

$$(2HS / \omega_s)\ d^2\delta/dt^2 = P_m - P_e \qquad \text{(MW)}$$

$$(2H / \omega_s)\ d^2\delta/dt^2 = P_m - P_e \qquad \text{(pu)} \qquad (10.100)$$

ولقد تم اهمال الدليل pu في المعادلة الواحدية لغرض الاختصار مع استخدام مقنن الآلة كأساس عند التحويل الى القيم الواحدية. ويجب عند دراسة استقرارية منظومات القوى متعددة الآلات استخدام اساس مشترك لجميع عناصر المنظومة عند التعبير عن القيم الواحدية للكميات الواردة في معادلة التأرجح (100). ويتم ذلك بتحويل P و H من القيم الواحدية ذات الدليل old المعطاه استناداً للأساس القديم S_{old} للآلة الى القيم ذات الدليل new المسندة الى S_{new} المشتركة للمنظومة كما يلي:

$$P_{new} = P_{old}\ (S_{old} / S_{new})\ , H_{new} = H_{old}\ (S_{old} / S_{new}) \qquad (10.101)$$

وعند دراسة استقرارية المنظومات متعددة الآلات وبغية تقليل عدد معادلات التأرجح المطلوب حلها يمكن النظر الى اللآلات المتجاورة والبعيدة كهربائياًعن مكان العطب او الاضطراب على انها تتأرجح معاً وبنفس القدر. ويتم في هذه الحالة تمثيل المولدات المتماسكة في المحطة الواحدة بوحدة مكافئة وكأن دوراتها مقرونة ميكانيكياً مع بعضها البعض بحيث يكتفى بمعادلة تأرجح واحدة لجميع الآلات. وعند تطبيق ذلك على وحدتين مرتبطتين بنفس القضيب يمكن كتابة معادلة التأرجح لكل آلة وجمع المعادلتين للحصول على معادلة تأرجح مكافئة لهما في صيغة المعادلة (10.100) كما يلي:

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta\ , \qquad \omega_{s1} = \omega_{s2} = \omega_s$$

$$H = H_1 + H_2\ ,\ P_m = P_{m1} + P_{m2}\ ,\ P_e = P_{e1} + P_{e2} \qquad (10.102)$$

ويمكـــن الحصـــول علـــى معادلـــة تـــأرجح واحـــدة لآلـــتين غـــير متماســـكتين (non-coherent) بقســـمة طـــرية معادلـــة تـــأرجح كـــل منهمـــا علـــى H وطرحهمـــا مـــن بعضـــهما وضـــرب النـــاتج ية المعامـــل H_{12} حيث نجد ان (لاحظ ان معادلة P_{12} تنطبق على P_m و P_e):

$$(2/\omega_s)\ d^2\delta_1/dt^2 - (2/\omega_s)\ d^2\delta_2/dt^2 = (P_{m1}-P_{e2})/H_1 - (P_{m2}-P_{e2})/H_2$$

$$H_{12} = H_1H_2/(H_1+H_2)\ , \qquad P_{12} = (P_1H_2-P_2H_1)/(H_1+H_2)$$

$$(2H_{12}/\omega_s)\ d^2\delta_{12}/dt^2 = P_{m12} - P_{e12} \quad \text{(pu)} \qquad (10.103)$$

ويمكـن تطبيق معادلة التأرجح المكافئة للآلات غير المتماسكة (10.103) بغية تبسيط منظومة ذات آلـتين مربـوطتين بشـبكة نقـل ذات مقاومـة مهملـة تعمـل الاولى كمولـد وتعمـل الثانيـة كمحـرك تـزامني بحيث يمكـن تمثيلهما بمنظومـة آلـة مكـافئـة مربوطـة بقضـيب لانهـائي. ويتضح ية هذه الحالـة ان أي تغير ية قـدرة المولـد سـيقابلها تغير مسـاوي ومعاكس ية قدرة المحرك، حيث نجد ان:

$$P_{m1} = -P_{m2} = P_m\ , \qquad P_{e1} = -P_{e2} = P_e$$

$$(2H_{12}/\omega_s)\ d^2\delta_{12}/dt^2 = P_m - P_e \quad \text{(pu)} \quad (10.104)$$

وتعكس الحالة السابقة الطبيعة النسبية لخاصية الاستقرارية والتي يحددها السلوك الديناميكي للآلة نسبة لبقية الآلات في المنظومة. ويتبين من منظومة الآلتين ان شرط الاستقرارية هو نقصان الفارق بين زوايا قدرة الآلات (δ_{12} مثلاً) بعد زوال الاضطراب. ويمكن في هذه الحالة النظر الى القضيب الانهائي على انه يمثل آلة ذات ق.د.ك ثابتة ومعاوقتها صفر وثابت قصورها مالانهاية.

3.4.10. 1. ديناميكا الاضطرابات الصغيرة.

تهدف دراسة ديناميكا الاضطرابات الصغيرة لدراسة سلوك الآلة للتغيرات الصغيرة المتدرجة مثل التغيرات البسيطة في التوليد. وتلعب فقودات اضطراب الهواء والاحتكاك دور مهم في اخماد تذبذب سرعة المولد وينظر لها كثابت يطرح من قدرة المحرك الاولى للحصول على صافي القدرة الميكانيكية. وعند ابتعاد الدوار عن سرعة التزامن تعمل لفائف الاخماد على انتاج قدرة الاخماد ΔP_d تتناسب مع التغير في السرعة $\Delta\omega$ وفقاً لمعامل قدرة الاخماد K_d حيث:

$$K_d = dP/d\omega = \Delta P/\Delta\omega$$

$$\Delta P_d = (dP/d\omega)\,\Delta\omega = K_d\,\Delta\omega \qquad (10.105)$$

وتحاول الآلة التزامنية ذاتياً الحفاظ على تزامنها حيث ينتج التغير في زاوية القدرة تغير مضاد في القدرة للحفاظ على الاتزان. وبالنظر الى مولد يعمل في حالة مستقرة ثابتة مغذياً قدرة كهربائية محددة مع ثبوت القدرة الميكانيكية الداخلة عند تعرضه لاضطراب نجد ان ذلك سيؤدي الى تغير زاوية القدرة بقدر صغير $\Delta\delta$ يمكن معه تمثيل منحى $P\text{-}\delta$ بخط مستقيم على مدى Δ. ويمكن في هذه الحالة الحصول من

المعادلة (81.10) على التغير المضاد في القدرة الكهربائية ΔP_s كما يلي:

$$K_s = dP/d\delta = (VE/X_d)\cos\delta + V^2 (1/X_q - 1/X_d) \cos 2\delta$$

$$\Delta P_s = (dP/d\delta)\,\Delta\delta = K_s\,\Delta\delta \qquad (10.106)$$

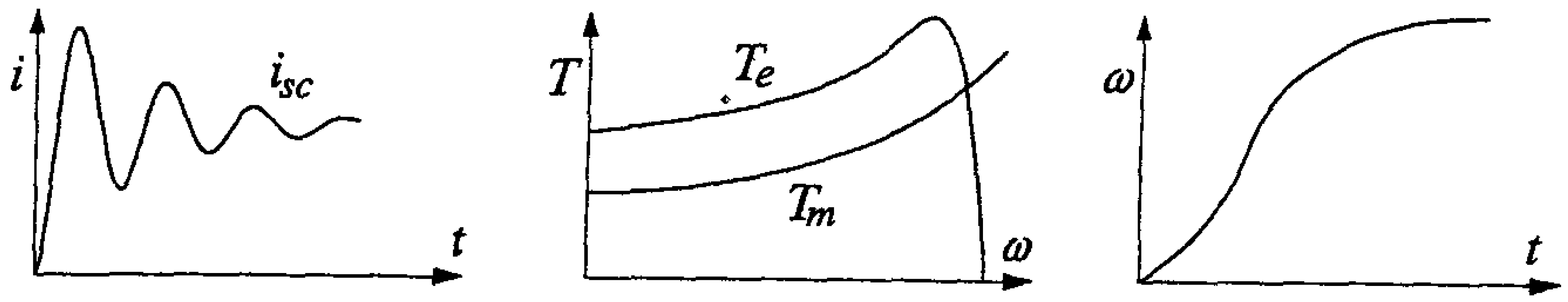
حيث تعرف ΔP_s بقدرة التزامن التي تعود الى خاصية منحنى القدرة- الزاوية وتتناسب مع التغير في زاوية القدرة حيث يسمى معامل التناسب K_s بمعامل قدرة التزامن. ويتناسب معامل قدرة التزامن عكسياً مع زيادة الحمل حيث يبلغ قيمته العظمى عند اللاحمل (δ_0=0) ويقل مع زيادة الحمل ليصل الصفر عند الحمولة العظمى (δ_0=90°). وبذلك يشترط لاستقرارية الآلة ان يكون معامل قدرة التزامن موجباً ($0 < \delta < 90°$). وعليه يمكن اعادة كتابة معادلة التأرجح (100.10) لمولد يتعرض لاضطراب صغير ينتج تغير بسيط $\Delta\omega$ في سرعة دوار المولد و $\Delta\delta$ في زاوية القدرة كما يلي:

$$(2H/\omega_s)\,(d^2\delta/dt^2) = \Delta P_m - K_d\,\Delta\omega - K_s\,\Delta\delta \quad \text{(pu)} \qquad (10.107)$$

وقد تفقد الاضطرابات الصغيرة الآلة تزامنها عند الزيادة الثابتة المستمرة في زاوية القدرة لعدم توفر قدرة تزامن كافية؛ او عند التغير المتذبذب في زاوية القدرة لعدم كفاية قدرة الاخماد. وقد يتسبب تسارع او تباطؤ الدوار نتيجة لنقصان قدرة التزامن في تغير الطاقة الحركية للآلة بشكل يؤدي الى تأرجح مفرط في الزاوية ينتج بدوره قدرة كبيرة تتسبب في تغير دوري ومتواصل في السرعة فيما يعرف بظاهرة الشطط التي تستمر حتى تتبدد الطاقة الحركية التي اكتسبها دوار الآلة اثناء تغير سرعته.

4.10 السلوك العابر للمحركات الحثية.

عند تعرض المحرك لقصر ثلاثي الطور على اطرافه ستقوم قضبان قفص الدور في المحرك الحثي اساساً بنفس دور لفائف الاخماد على سطح دوار الآلة التزامنية. وبذلك سيتدفق تيار ضخم في المحرك الحثي في الفترة دون العابرة عند حدوث القصر. ونظراً لعدم وجود لفائف مجال في المحرك الحثي فإن الفترة العابرة الطويلة للآت التزامنية المقصورة لن تكن موجود في حالة المحرك الحثي. ولذلك ستكون تيار القصر اضخم في المحرك الحثي ولكنها تتلاشى في زمن اقصر مقارنةً بالآلة التزامنية. وستلاشى التيار هنا بثابت زمني واحد هو ثابت الفترة دون العابرة وكما هو مبين في الشكل (13).



شكل (13) السلوك العابر الديناميكي للمحرك الحثي.

ولايعاني المحرك الحثية من مسألة التزامن المصاحبة للآلة التزامنية اذ يمكنه انتاج عزم بسرعات تختلف عن سرعة التزامن، ولكنه يعاني من مسأل البدء وتغيرات الحمولة الميكانيكية. فعند بدء المحرك بتوصيله مباشرةً بالمصدر سيتدفق تيار ابتدائي ضخم قد يصل 8 اضعاف التيار المقنن ولكنه يتلاشى سريعاً مع ارتفاع السرعة. ويبين الشكل (13) منحنى العزم- السرعة للمحرك لحمل نموذجي. وبسبب ضخامة عزم القصور للمحرك والحمولة سيكون تغير السرعة في البداية صغير جداً. وتمثل علاقة العزم- السرعة للحالة الثابتة اداء

المحــرك عنــدء البــدء وبدقــة كافيــة حيــث يمكــن اعتبــار النظــام الكهربائي في شبه حالة ثابتة اثناء فترة البدء التي قد تمتد لغاية 15 ثانية لبلوغ السرعة الثابتة. ويمكن التعبير عن علاقة العزم- السرعة كما يلي:

$$J\, d\omega/dt = T_e - T_m \qquad (10.108)$$

5.10 أمثلة محلولة

1 - مولد DC اثارة مستقلة فيه $R_f=100\ \Omega$ ، $L_a=0.02$ H ، $L_f=25$ H ، $R_a=0.25$ H ، $K_g=100$ V حيث $e_a=K_g i_f$. فاذا طبق V 200 فجأة على المجال عند دوران المولد بالسرعة المقننة، احسب معاملات معادلة جهد المنتج واكتبها في نطاق الزمن واحسب جهد الحالة الثابتة وزمن بلوغ 90% من جهد الحالة الثابتة..

(200(1-e^{-4t}) V, 200 V, 0.575 s)

الحل:

$$e_a(t) = \frac{K_g V_f}{R_f}(1-e^{-t/\tau_f}) \qquad ,\tau_f = \frac{Lf}{Rf} = 0.25$$

$$e_a(t) = \frac{100*200}{100}(1-e^{-4t}) = 200(1-e^{-4t})$$

عند الحالة الثابتة اى $t=\infty$

$$e_a(\infty) = 200(1-e^{-\infty}) = 200V$$

عند 90٪ من جهد الحالة الثابتة اى 180=0.9*200 فولث ويكون الزمن المطلوب هو:

$$180 = 200(1-e^{-4t}) \Rightarrow t = 0.575\sec$$

2 - محرك DC -4 اقطاب اثارة مستقلة فيه $R_a=0.5\ \Omega$، $L_a\approx 0$ H ينتج كمولد يدار بسرعة 2000 rpm واثارة 1 A جهد 220 V عند اللاحمل. يدير المحرك حمل ثابت عزمه 25 Nm وعزم قصوره مع الحمل $2.5\ kg.m^2$ بنفس تيار الاثارة. فاذا غذي المحرك من مصدر 220 V اشتق معادلتي سرعة وتيار المنتج كدالة في الزمن واحسب قيم الحالة الثابتة. ($\omega=198.2(1-e^{-0.8824t}$, $i_a=23.8+416.2e^{-0.8824t}$, 198.2 rps, 23.8 A)

الحل:

$Ea=K_m\,\omega_m=220\ V$, N=2000 rpm , $\omega=\frac{2\pi N}{60}$

$K_m=Ea/\omega_m=1.05$ V.s/rad

$Vt=e_a+i_a Ra=K_m\,\omega_m+i_a Ra$----------------------(1)

$Ta=K_m\,i_a=J\frac{d\omega m}{dt}+Tl$----------------------------(2)

$ia=\frac{1}{Km}(J\frac{dwm}{dt}+Tl)$

بالتعويض عن التيار فى معادلة(1)

$Vt=K_m\,\omega_m+\frac{Ra}{Km}(J\frac{dwm}{dt}+Tl)$

$Vt=1.05\,\omega_m+\frac{0.5*2.5}{1.05}\frac{dwm}{dt}+\frac{0.5*25}{1.05}=200\ v$

$200=1.05\,\omega_m+1.19P\,\omega_m+11.9$

باستخدام تحويل لابلاس للمعادلة نجد ان:

$200/S=1.05\,\omega_m(S)+1.19\,S\,\omega_m(s)+11.9/S$

$\omega_m(s)(1.05+1.19\,S)=1/S(220-11.9)$

$$\omega_m(s)=\frac{189.1}{S(1.05+1.19S)}=\frac{174.87}{S(S+0.8824)}$$

$$\omega_m(s)=\frac{198.2}{S}-\frac{198.2}{S+0.8824}$$

بتحويل الى النظام الزمني نجد معادلة السرعة كدالة فى الزمن هى:

$$\omega_m(t)=198.2(1-e^{-0.882t})$$

ولايجاد التيار كدالة فى الزمن :

$$ia=\frac{Vt-Km\,\omega m(t)}{Ra}=\frac{200-1.05\omega m}{0.5}$$

$$=440-2.1*198.2(1-e^{-0.884t})$$

$$ia=23.8-416.1(e^{-0.884t})\qquad A$$

$W=\omega_m(\infty)=198.2$ rad/sec

$Ia=ia(\infty)=23.8$ A

3 - مولد تزامني ثلاثي الطور ذو اقطاب بارزة مفاعلات منتجه على المحورين المباشر والمتعامد 1.0 pu و 0.6 pu على الترتيب، اهمل مقاومة المنتج واحسب جهد الاثارة بالنظام الواحدي اثناء تغدية المولد لحمولة مقننة كاملة بمعامل قدرة 0.8 متأخر وعند جهد الاطراف المقنن للمولد. ($1.77\angle 19.4^\circ$)

4 - محرك تزامني ثلاثي الاطوار ذو اقطاب بارزة مقنناته 2000 hp، 2300 V ومفاعلات محوريه المباشر والمتعامد 1.95 Ω و 1.40 Ω لكل طور، اهمل جميع المفاقيد واحسب زاوية وقيمة القدرة الفعالة العظمى التي يمكن للمحرك ان يبدلها اثناء تغديته من قضيب لانهائي عند الجهد والتردد المقنن مع ثبوت مستوى اثارتة عند ذات القيمة التي تنتج القدرة المقننة بمعامل قدرة.1.0. (73.2°, 3240 KW)

5 - مولد تزامني مفاعالته التزامنية 0.70 للوحدة متصل بقضيب لانهائي ويغدي قدرته المقننة عند الجهد المقنن ومعامل قدرة 0.8 متأخر. اهمل جميع الفقودات وارسم المخطط الطوري للمولد ثم احسب كل من جهد الاثارة وزاوية القدرة والقدرتين الفعالة والمتفاعلة: (أ) عند شروط التشغيل المقننة؛ (ب) عند رفع القدر الميكانيكية الداخلة بنسبة 20%؛ (ج) عند رفع مستوى الاثارة بنسبة 20%. (1.53, 21.5°, 0.8, 0.6 - 1.53, 26.1°, 0.96, 0.535 - 1.84, 17.8°, 0.8, 1.07)

6 - مولد تزامني مفاعالته العابرة 0.20 للوحدة متصل بقضيب لانهائي عن طريق خط مفاعلته 0.30 للوحدة. فأذا كان المولد يغدي حمولته المقننة (1.0 للوحدة) وجهد كل من اطراف المولد والقضيب اللانهائي 1.0 للوحدة، احسب قيمة القدرة الفعالة العظمى التي يمكن للمولد ان يغديها للقضيب اللانهائي. (2.10 pu)

7 - مولد تزامني ثلاثي الاطوار توصيلة نجم مفاعلته التزامنية 8.5 Ω للطور متصل بقضيب لانهائي جهده 11 KV ويغدي 180 A بمعامل قدرة 0.9 متأخر. فأذا ثبتت القدرة الميكانيكية ورفع مستوى الاثارة بنسبة 25% احسب التيار ومعامل القدرة في هذه الحالة. واذا تم تثبيت الاثارة عند المستوى الجديد ورفعت القدرة الميكانيكية تدريجياً احسب القدرة الخارجة التي يفقد عندها المولد تزامنه. (334 A, 0.485 lag, 20 MW)

8 - محرك تزامني ثلاثي الاطوار نجمة مقنن جهده 440 V ومفاعلته التزامنية 2 Ω لكل طور ومقاومة منتجه مهملة تم تحميله بحمولة معينة مع ضبط مستوى الاثارة بحيث يسحب المحرك تيار قدره

100 A بمعامل قدرة الواحد. فأذا تم عند نفس الحمولة السابقة رفع مستوى الاثارة بنسبة 25%، احسب مقدار ومعامل قدرة التيار المسحوب في هذه الحالة. واذا تم زيادة الحمولة تدريجياً مع تثبيت الاثارة عند المستوى الجديد، احسب الحمولة التي يفقد عندها المحرك استقراريته ومقدار ومعامل قدرة تيار المحرك في هذه الحالة. (111.17 A, 0.8995 lead, 154 KW, 238.68 A, 0.8466 lead)

9 - مولد تزامني تربيني ذو قطبين مقنناته 100 MVA و 60 Hz. فاذا كان عزم القصور الذاتي للكتلة الدوارة لوحدة التوليد 50000 kg.m2 وكان المولد يعمل في حالة ثابتة مغذياً حمولته المقننة الى قضيب لانهائي عندما فقد بشكل فجائي 25 MW من حمولته الكهربائية، احسب (أ) الطاقة المخزونة في الكتلة الدوارة وثابت القصور، (ب) كمية الحركة والتسارع الزاوي الناتج عن الاضطراب. (3553.06 MJ, 35.53 MJ/MVA, 18.85 Mjs/e.rad, 75.99 e°/s2).

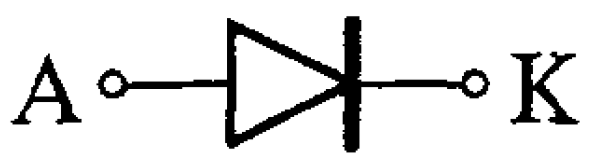
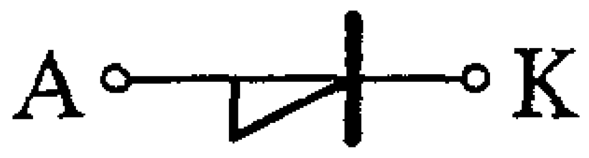
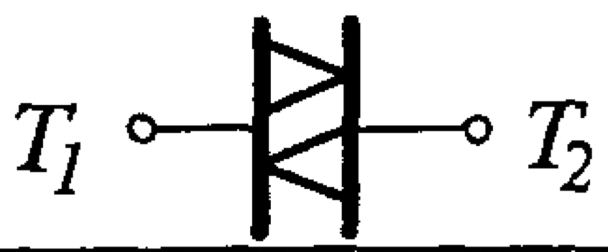
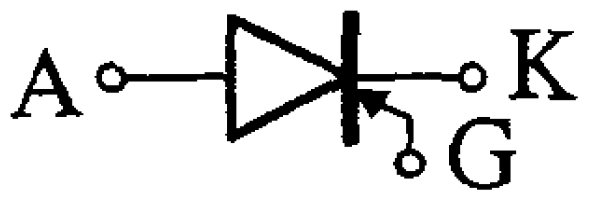
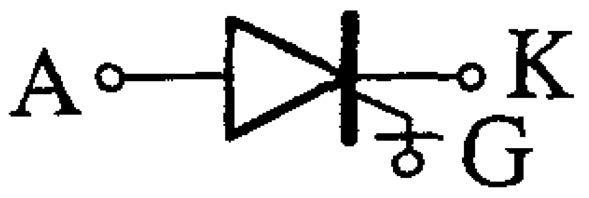
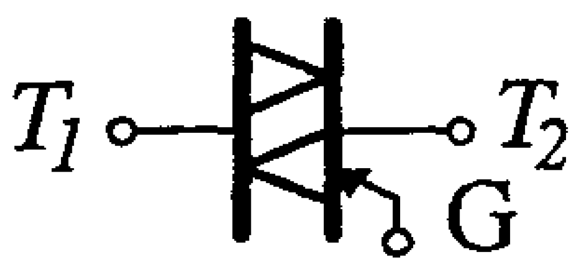
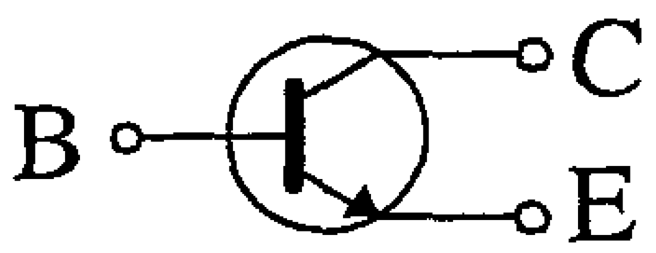
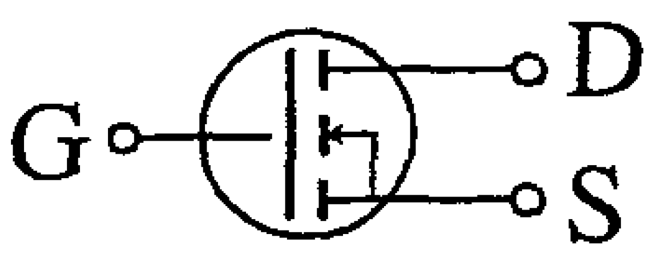
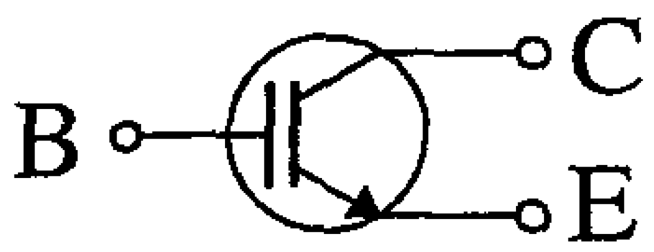
الفصل الحادي عشر

الكترونيات القدرة

11-1 مقدمة.

بدأت تطبيقات الكترونيات اشباه الموصلات بالانتشار في العقد السابع من القرن العشرين مع اختراع الثايرستور الذي عرف بالمقوم السليكوني المحكوم (SCR) واستخدامه بدل الصمامات المفرغة في المقومات المحكومة. وقد ادى ذلك تدريجياً الى ظهور احد اهم مجالات الدراسة والابحاث الجديدة المتخصصة في هندسة القوى الكهربائية فيما يعرف الآن بالكترونيات القوى. ويعد التحكم في الآلات الكهربائية احد اهم مجالات تطبيقات الكترونيات القوى لما توفره من ميزات ومرونة ودقة في التحكم. وقد تطورت صناعة وتطبيقات الكترونيات القوى الى درجة اصبح معها من الممكن توفير جميع متطلبات أي من انواع التحكم في القوى الكهربائية. وقد ساعد على ذلك تطور تقنيات اشباه الموصلات والانخفاض الهائل في اسعار ادوات الكترونيات القوى وما صاحبه من ارتفاع في قدرتها وكفاءتها واعتماديتها وتنوع خصائصها.

ويجب التفريق بين ادوات الكترونيات القوى عالية القدرة وما يناظرها من الادوات الالكترونية الصغيرة محدودة القدرة والمجمعة في دوائر متكاملة في الاجهزة الالكترونية. ويبين الجدول (1) اهم ادوات الكترونيات القوى التي تم استخدامها في دوائر التحكم في الآلات الكهربائية ومصادر القوى الكهربائية المتغيرة ورموز هذه الادوات :

ت	الاداة	Device	الرمز
1	الدايود	Diode	
2	دايود PNPN	PNPN Diode	
3	الدياك	DIAC	
4	ثايرستور SCR	SCR Thyristor	
5	ثايرستور GTO	GTO Thyristor	
6	الترياك	TRIAC	
7	ترانزيستور القوى	Power Transistor	
8	ترانزيستور MOSFET	Power MOSFET	
9	ترانزيستور IGBT	IGBT Transistor	

الجدول (1) ادوات الكترونيات القوى ورموزها

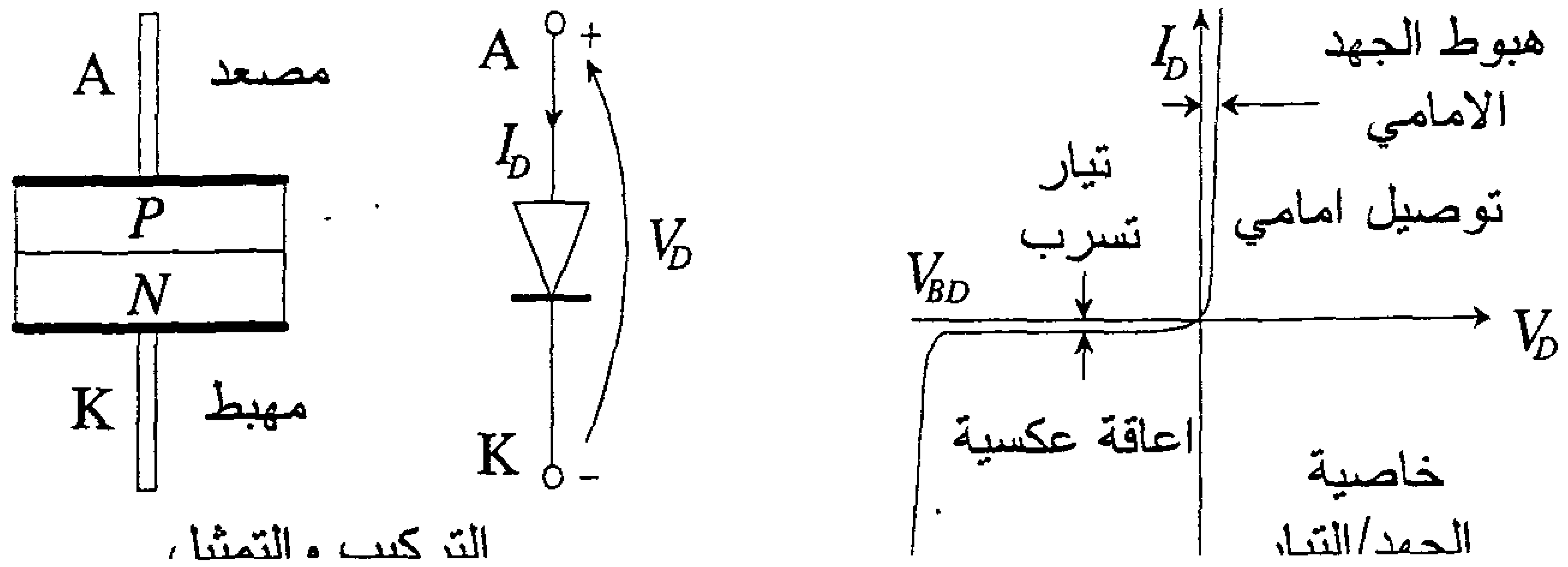
2-11 خصائص الوصل/القطع لأدوات الكترونيات القوى.

تتفاوت استخدامات ادوات الكترونيات القوى وفقاً لتكوينها وقدراتها وما يميزها من خصائص حيث لا يسمح المجال هنا بدراسة هذه الخصائص بالتفصيل ولكل هذه الادوات. وسيكتفى هنا بعرض موجز لأهم الخصائص والمميزات لبعض الادوات الاكثر استخداماً في

الحياة العملية مع تناول الثايرستور وأنظمته بتفصيل اكثر لاحقاً باعتباره اكثر ادوات الكترونيات القوى شهرةً. لذلك سيتم تناول خصائص كل من دايود القوى ودايود PNPN والدياك كنماذج لادوات الكترونيات القوى غير المحكومة، والثايرستور والترياك والترانزيستور كمثال للادوات المحكومة وجميعها تستخدم في دوائر الكترونيات القوى كمفاتيح.

11-2-1- دايود القوى:

يسمح الدايود (الصمام الثنائي) بتدفق التيار في اتجاه واحد من المصعد الى المهبط وينظر له في الحالة المثالية كمفتاح كهربائي يقفل الدائرة لوصل التيار في اتجاه واحد ويفتحها لقطع التيار في الاتجاه الآخر. ويبين الشكل (1) خاصية الجهد/التيار للدايود حيث يتم وصل الدائرة ويسمح بتدفق تيار كبير عند تسليط جهد امامي يجعل المصعد موجباً بالنسبة للمهبط وعادةً لا يتجاوز هبوط الجهد عبر الدايود الفولت الواحد. وعند تسليط جهد عكسي يجعل المصعد سالباً بالنسبة للمهبط يكون الدايود شبه مفتوح ولن يسمح بتدفق التيار الا بقيم صغيرة جداً لا تتجاوز بضع ميكروامبيرات يمكن تجاهلها واعتبار الدائرة مفتوحة. وعند تجاوز الجهد العكسي المطبق قيمة محددة تسمى الجهد العكسي الاعظم PRV سينهار الدايود ويسمح بتدفق تيار ضخم في الاتجاه العكسي كما الاتجاه الامامي ولذلك يجب الا يتجاوز الجهد العكسي هذه القيمة لضمان قيام الدايود بعملية الوصل/القطع.



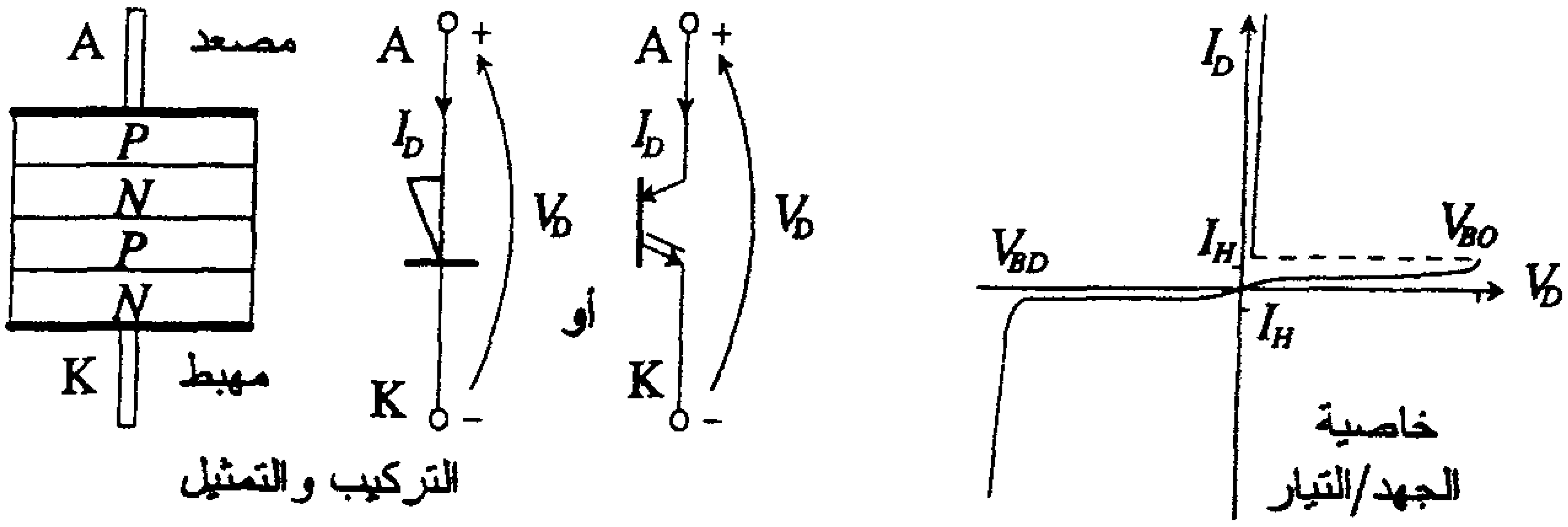
شكل (1) خاصية الجهد/التيار لدايود القوى.

ويتحدد مقنن الدايود اساساً بمقدار القدرة التي يبددها اثناء التوصيل الامامي والجهد العكسي الاعظم وزمن التوصيل. ويجب الا تتجاوز القدرة المبددة والتي تساوي حاصل ضرب الجهد عبر الدايود في التيار المار خلاله، الحد الذي قد يتسبب في التسخين المفرط للدايود وأتلافه. ويجب ان يكون الجهد العكسي الاعظم اكبر من الجهد العكسي المتوقع تعرض الدايود له لضمان عدم التوصيل في الاتجاه العكسي. ويمثل زمن التوصيل الزمن اللازم للتغير من حالة تشغيل الى اخرى، وهو زمن طويل في دايود القوى مقارنة بدايود الدوائر الالكترونية، ولكنه مناسب لتردد دوائر القوى الاعتيادية.

11-2-2 – دايود PNPN:

يسمى دايود PNPN احياناً بالثايرستور الدايودي (Diode-type Thyristor) لكونه يمثل ثايرستور ذو سلكين غير محكوم وهو يختلف في كونه يتكون من اربعة طبقات PNPN بدل طبقتين PN في الدايود، وبذلك فهو ينتمى الى عائلة الثايرستور. ويتميز دايود PNPN بخاصية الجهد/التيار تختلف عن دايود القوى في منطقة الانحياز الامامي كما هو مبين في الشكل (2) حيث يمكن تقسيم الخاصية الى منطقتي الاعاقة (blocking) الامامية والعكسية

ومنطقة التوصيل الامامي. ففي منطقة الاعاقة العكسية يتصرف دايود PNPN مثل الدايود العادي ويعيق تدفق التيار الى ان يصل الجهد عبره الى جهد الانهيار العكسي VR. وفي منطقة التوصيل الامامي يشبه تصرف دايود PNPN الدايود العادي في السماح بتدفق تيار ضخم بهبوط جهد صغير جداً، ولكنه يتميز عن الدايود بمنطقة الاعاقة الامامية.

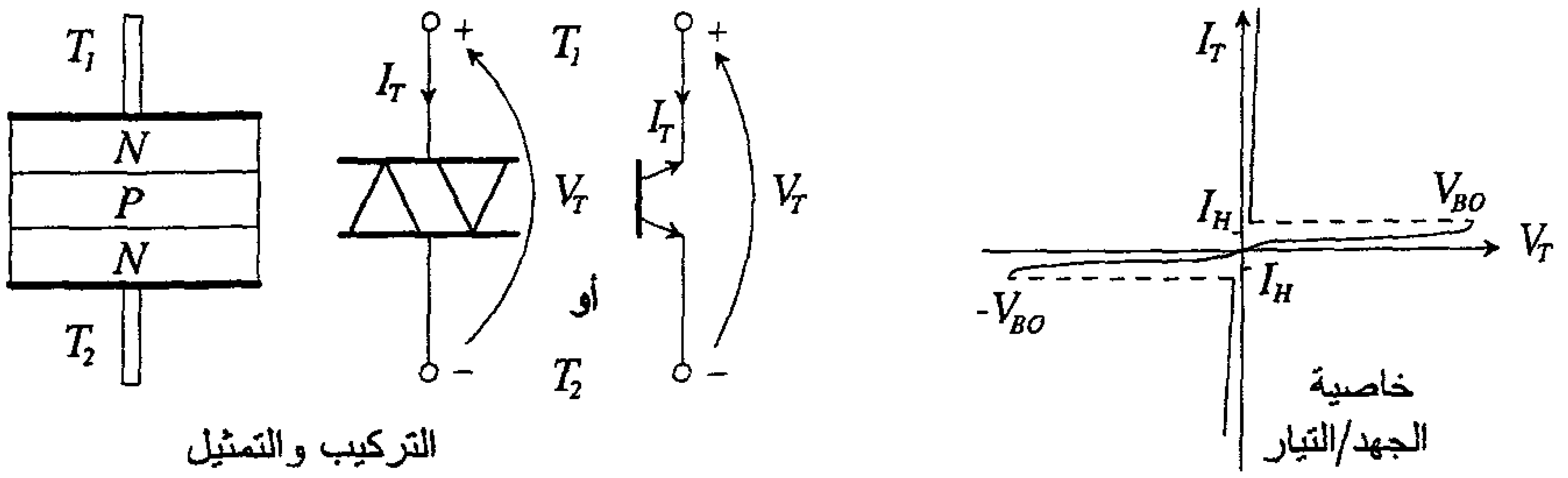


شكل (2) خاصية الجهد/التيار لدايود PNPN.

عندما يتحول دايود الى PNPN الى الانحياز الامامي (حيث منطقتي التوصل والإعاقة الامامية) لن يتدفق التيار حتى يتجاوز جهد الانحياز الامامي قيمة محددة VBO تعرف بجهد الانطلاق (break over) ليتحول عندها الى حالة الوصل ويبقى في هذه الحالة حتى يقل التيار عن قيمة محددة I_H تقاس بالميللي امبير تعرف بتيار الامساك (holding)، وعندها يقطع دايود PNPN ولا يعيد الوصل الا بعد تجاوز جهد الانحياز الامامي جهد الانطلاق مرة اخرى. وبذلك يمكن تلخيص عمل دايود PNPN في ثلاثة حالات وهي الوصل عند تجاوز الجهد عبره V_D جهد الانطلاق VBO، والقطع عند نقصان التيار عبره I_D الى اقل من جهد الامساك I_H، وإعاقة تدفق التيار في الاتجاه العكسي الى ان يتم تجاوز الجهد العكسي الاعظم VBO.

3-2-11 الدياك:

يشبه سلوك الدياك السلوك المشترك لاثنين من دايودات PNPN متصلين ببعضهما البعض معاً من الخلف (back to back). ويمكن للدياك التوصيل في أي من الاتجاهين عند تجاوز جهد الانطلاق في الاتجاهين. ويبين الشكل (3) خاصية الجهد/التيار للدياك حيث يتم الوصل عند تجاوز الجهد المطبق عليه في أي اتجاه جهد الانطلاق V_{BO}. وبعد دخول حالة الوصل سيظل الدياك في هذه الحالة الى ان يهبط التيار المار خلاله الى اقل من تيار الامساك I_H.



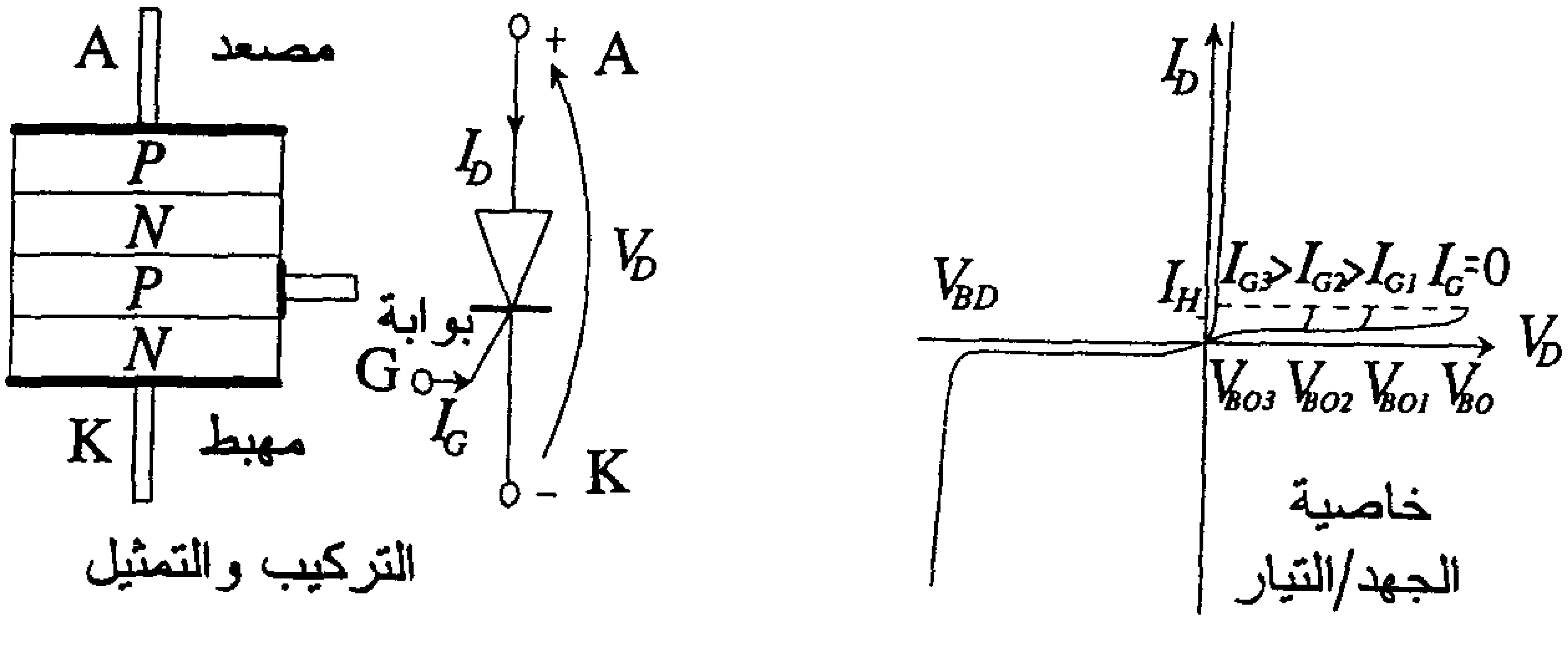
شكل (3) خاصية الجهد/التيار للدياك.

4-2-11 ثايرستور SCR:

يعد الثايرستور الاكثر شهرة واستخداماً من بين ادوات الكترونيات القوى ويعد ثايرستور SCR الاكثر استخداماً من عائلة الثايرستورات وهو يمثل حجر الاساس فيما يمكن تسميته بثورة الكترونيات القوى. وتعود تسميته بمسمى المقوم السليكوني المحكوم (Silicon Controlled Rectifier) او اختصاراً SCR الى الاسم الذي اعطته له شركة GEC الامريكية عندما اعلنت عن اختراعه له في 1958، ولكن الهيئة التكنوكهربائية العالمية (IEC) اختارت له مسمى الثايرستور (Thyristor). وهو كما يوحى اسمه عبارة عن

دايود PNPN او مقوم محكوم حيث تشبه خاصية الجهد/التيار له عند استخدامه بدون اشارة تحكم تماماً خاصية دايود PNPN. ولا يختلف الثايرستور في تركيبه عن دايود PNPN الا في وجود سلك ثالث موصل بطبقة P يسمى سلك البوابة يمكن من خلاله التحكم في جهد الانطلاق.

وتعود شهرة الثايرستور وانتشار تطبيقاته الى امكانية تعديل جهد الانطلاق وضبطه لبدء التشغيل بتمرير تيار بسيط في سلك البوابة. وكلما زاد التيار الداخل الى البوابة كلما انخفض جهد الانطلاق اكثر كما يتضح من خاصية الجهد/التيار لثايرستور SCR المبينة في الشكل (4). فإذا تم اختيار مقننات ثايرستور SCR ليكون جهد انطلاقه عند عدم وجود اشارة تشغيل في البوابة اكبر من اعلى جهد محتمل عبر الثايرستور، لا يمكن عندها تشغيله في وضع الوصل الا بحقن التيار I_G في البوابة. وبعد دخول في حالة الوصل سيظل الثايرستور على هذه الحالة حتى عند قطع تيار البوابة والى ان يهبط التيار المار خلاله الى اقل من تيار الامساك I_H.



شكل (4) خاصية الجهد/التيار للثايرستور.

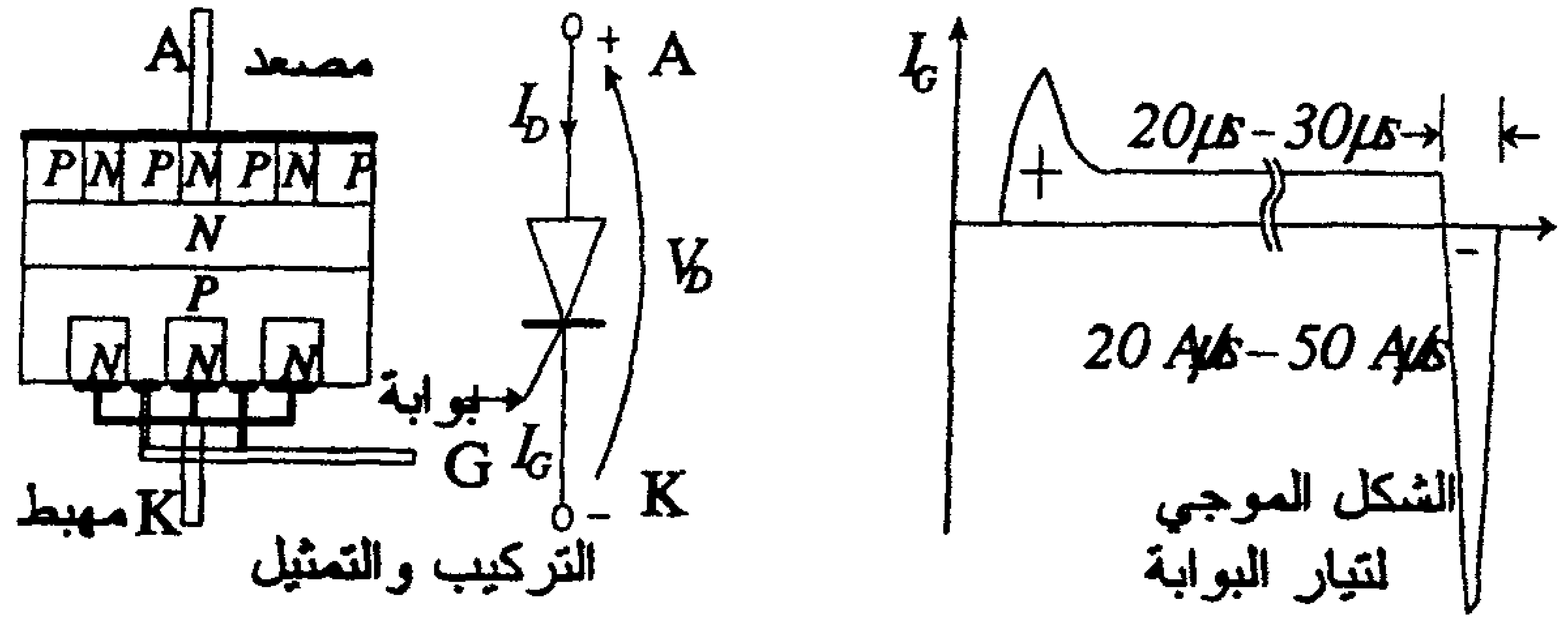
وبـذلك لا يعـد تيـار البوابـة مطلوبـاً الا لبـدء عمليـة الوصـل او التشـغيل حيـث يمكـن ازالتـه بعـد ذلـك دون ان يـؤدي ذلـك الى القطـع او توقـف التشـغيل مـا لم يهبط التيـار الى اقـل مـن تيـار الامسـاك. ولـذلك يسـمى تيـار البوابـة بتيـار القـدح (triggering) او الاشـتعال (firing) وهـو صغير جداً مقارنةً بالتيـار بـين المصـعد والمهبط، ويكفـي ان يكـون هذا التيار على شكل نبضة تيار قصيرة. وعندما يكـون الثايرسـتور في حالة توصيل يكون هبوط الجهد الامامي بين المصعد والمهبط حوالى 120% الى 150% مقارنة بهبوط الجهد الامـامي للدايود المناظر وهـو جهد صغير جداً.

ولسـهولة الـتحكم في تشـغيله يعـد ثايرسـتور SCR الاكثـر اسـتخداماً في دوائـر الـتحكم في القـدرة مثـل دوائـر الـتحكم في المحركـات الكهربائيـة. وتسـتخدم ثايرسـتورات SCR كـثيراً في تطبيقات الوصل/القطع والتقويه وهـي تتوفر حالياً بمقننـات تـتراوح بـين بضـع مللـي امـبيرات الى بضـع كيلـوامبيرات. ويمكـن تلخـيص عمـل ثايرستور SCR في ثلاثة حالات وهي الوصل عند تجاوز الجهد الامـامي V_D جهـد الانطـلاق V_{BO} الـذي يمكـن ضـبطه مسـتواه بمقـدار تيـار البوابـة I_G، والقطـع عنـد نقصـان التيـار عـبره I_D الى اقـل مـن جهـد الامساك I_H، وإعاقة تدفق التيار في الاتجاه العكسي الى ان يتم تجاوز الجهد العكسي الاعظم V_{BO}.

5-2-11 ثايرستور GTO:

يعد ثايرستور GTO من الادوات المتطورة والأحدث ضمن عائلة الثايرسـتور والـتي تمثـل عصـب دوائـر الكترونيـات القـوى. ويعـود اسمـه GTO الى امكانيـة ايقـاف توصـيله او اطفـاءه مـن البوابـة

(Gate Turn-Off) بحقن نبضة تيار سالبة ذات حجم كافي من خلال سلك البوابة حتى عندما يكون تيار الثايرستور I_D اكبر من I_H. ويتميز ثايرستور GTO عن ثايرستور SCRبانتفاء الحاجة الى وسائل وعناصر خارجية لإيقاف توصيل ثايرستور SCR في دوائر التيار المستمر دون خفض التيار لأقل من تيار الامساك. ويزداد انتشار تطبيقات ثايرستورات GTO تدريجياً بسبب هذه الميزة المهمة. ويبين الشكل (5) الشكل الموجي لتيار بوابة ثايرستور GTO ذو قدرة عالية.

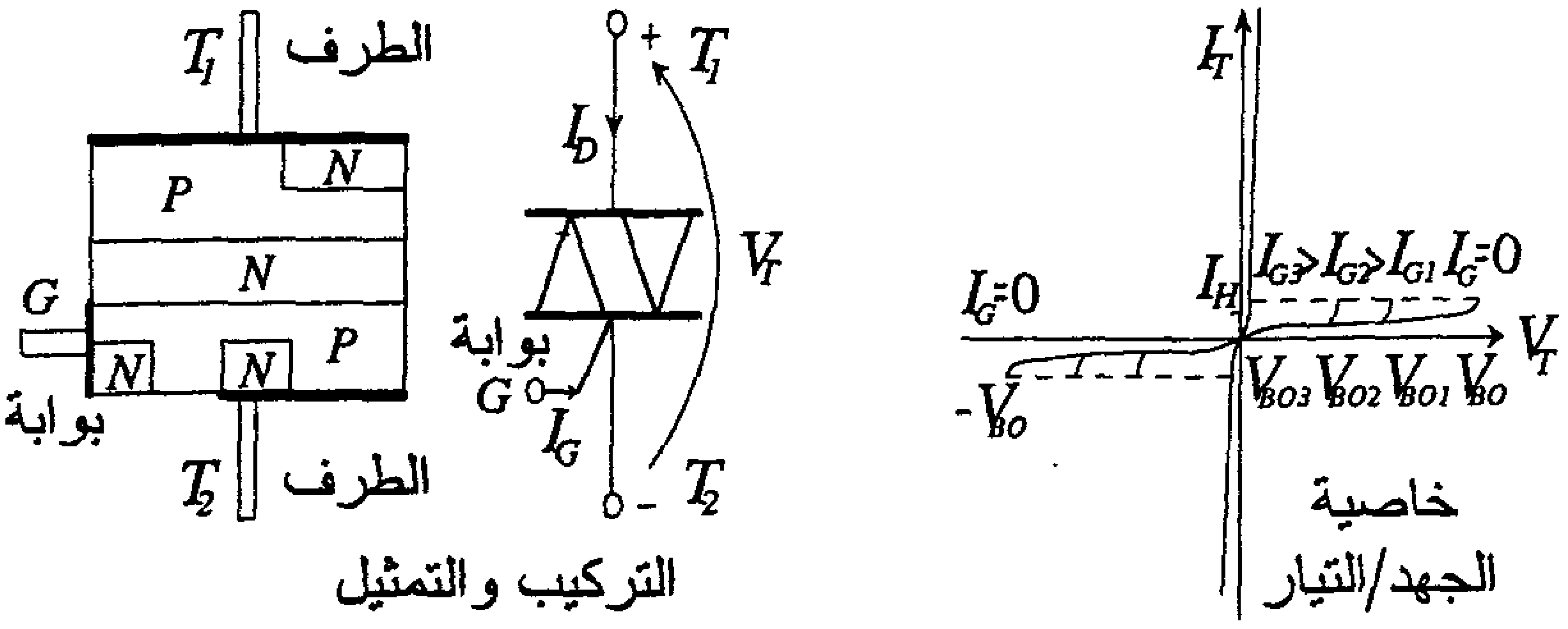


شكل (5) خاصية الجهد/التيار للدياك.

وعادةً ما يتطلب ثايرستور GTO حقن تيار قدح او اشتعال في البوابة اكبر نسبياً من تيار القدح المطلوب لثايرستور SCR العادي المناظر له في القدرة. وتتطلب ثايرستورات GTO ذات القدرة الكبيرة تيارات بوابة في حدود عشرة امبيرات او اكثر. وفي الحياة العملية عادةً ما يتطلب اطفاء ثايرستورات GTO تسليط نبضة تيار سالبة كبيرة على سلك البوابة لفترة تتراوح بين 20 μs و 30 μs وبذروة في حدود سدس الى ربع التيار المار خلاله.

6-2-11 الترياك:

يشبه سلوك الترياك السلوك المشترك لاثنين من ثايرستورات SCR متصلين ببعضهما البعض من الخلف (back to back) ويستخدمان سلك بوابة مشترك. ويمكن للترياك التوصيل في أي من الاتجاهين عند تجاوز جهده جهد الانطلاق في الاتجاهين. ويبين الشكل (6) خاصية الجهد/التيار للترياك حيث يتم خفض جهد الانطلاق بزيادة تيار البوابة كما في ثايرستور SCR. ولكن الترياك يختلف في كونه يستجيب لنبضات تيار البوابة الموجبة والسالبة ليقوم بالوصل في الاتجاهين. وبعد دخول حالة الوصل سيظل الترياك في هذه الحالة الى ان يهبط التيار المار خلاله الى اقل من تيار الامساك I_H.

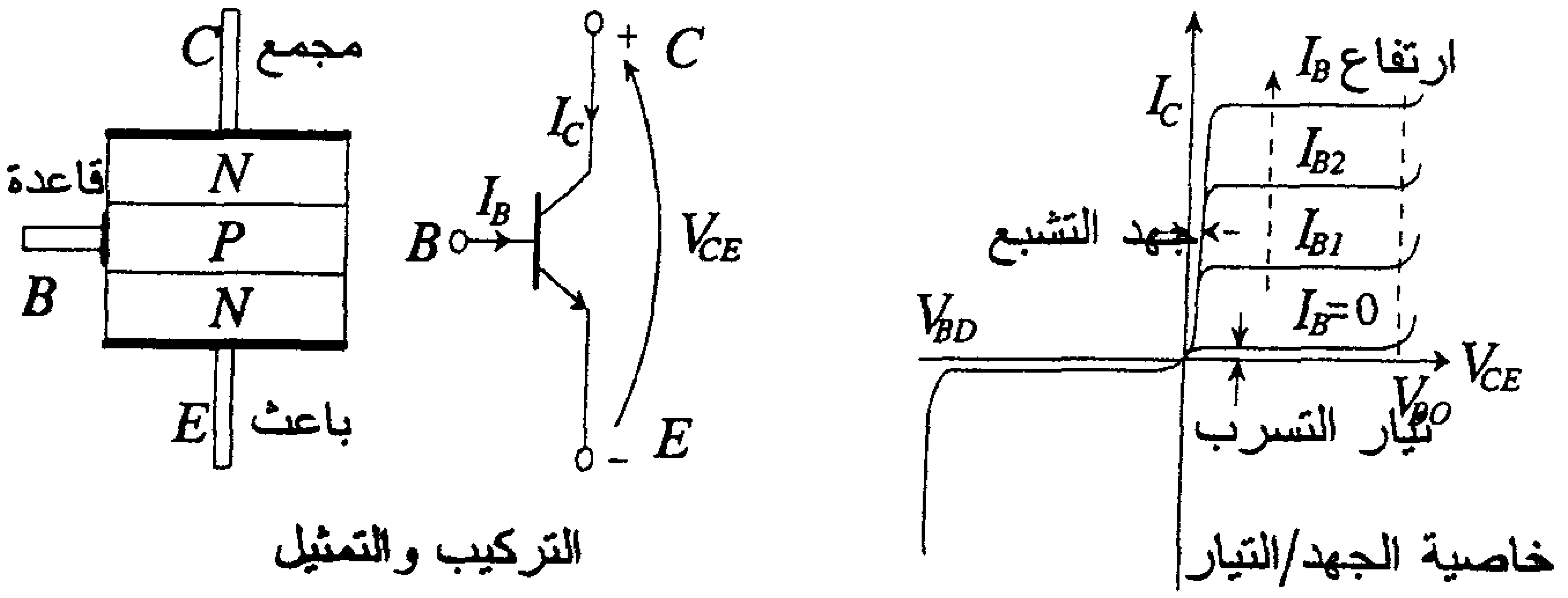


شكل (6) خاصية الجهد/التيار للترياك.

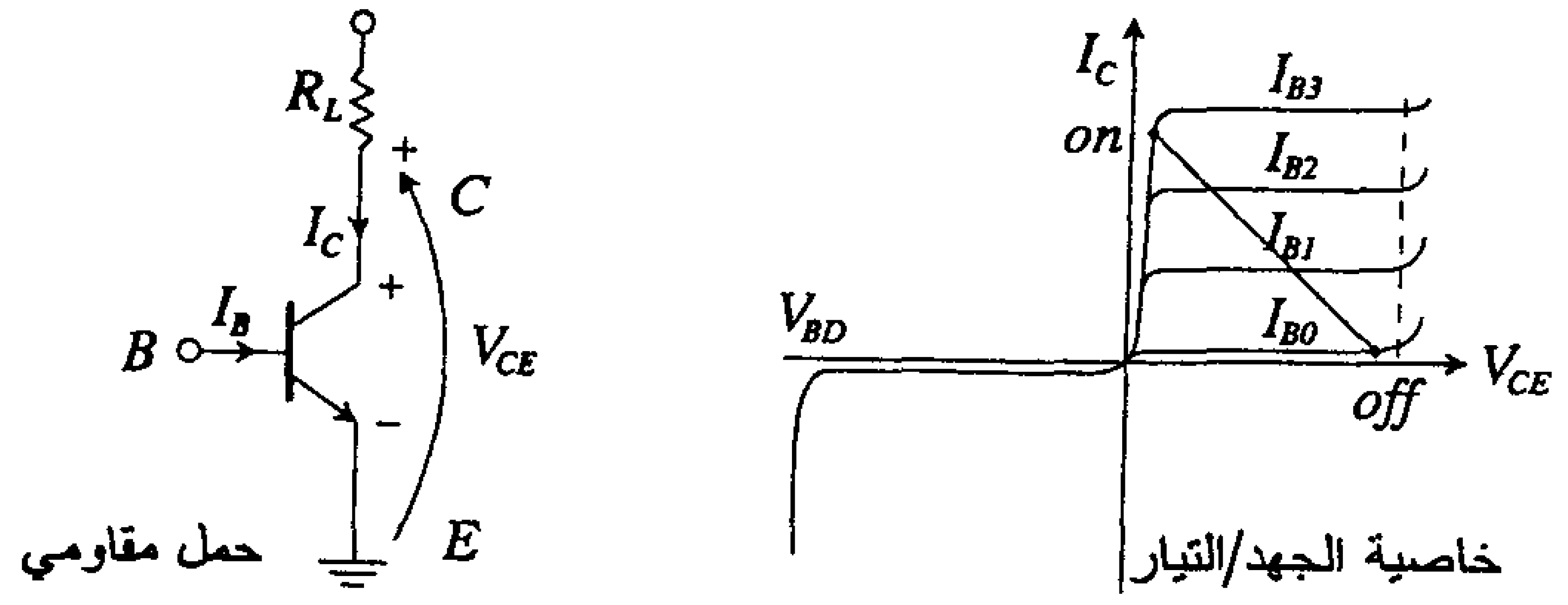
7-2-11 ترانزيستور القوى (BJT):

يبين الشكل (7) خاصية جهد المجمع- الباعث/تيار- المجمع للترانزيستور ذو الوصلة ثنائية- القطبية (BJT) حيث يتبين ان تيار المجمع يتناسب طردياً مع تيار القاعدة I_B على مدى واسع لمستوى جهد المجمع- الباعث VCE. وعادةً ما يتم استخدام ترانزيستور القوى (PTR) في تطبيقات التحكم في الاجهزة لوصل او قطع التيار. ويبين

الشكل (8) ترانزيستور ذو حمولة المقاومية وخاصية VCE/IC لهذا الترانزيستور مع خط الحمولة المقاومية. ولكون ترانزيستور القوى غالباً ما تستخدم كمفاتيح يجب فيها اما ان تكون موصلة تماماً او فاصلة تماماً. وكما في الشكل (8) سيؤدي تيار القاعدة $IB4$ الى التشغيل التام بينما تيار القاعدة الصفري الى التوقف التام عن التوصيل.



شكل (7) خاصية جهد المجمع- الباعث/تيار- المجمع للترانزيستور القوى.



شكل (8) خاصية الجهد المجمع- الباعث/تيار- المجمع للترانزيستور ذو حمل مقاومي.

وعندما يكون تيار القاعدة عند القيمة $IB3$ مثلاً سوف لن يكون الترانزيستور في حالة التوصيل التام ولا في حالة القطع التام. وهذه الحالة غير مرغوباً فيها اطلاقاً لأن تيار مجمع IC كبير سيتدفق في حين وجود جهد VCE كبير متسبباً في تبديد قدرة كبيرة وخطره

في الترانزيستور. ولضمان توصيل الترانزيستور بدون هدر قدرة كبيرة يجب ان يكون تيار القاعدة ذو حجم كبير بقدر كافي للوصول به الى حالة التشبع. وعادة ما تستخدم ترانزيستورات القوى في دوائر العكس لتحويل التيار المستمر الى متردد. ومن عيوب ترانزيستور القوى في تطبيقات الوصل/القطع انها بطيئة نسبياً للتغير من حالة الوصل او التشغيل الى حالة القطع او الاطفاء والعكس. ويعود ذلك الى للحاجة لتسليط او اخراج تيار قاعدة كبير نسبياً عند التشغيل او الاطفاء.

8-2-11 ترانزيستور MOSFET:

ينتمي الترانزيستور ذو التأثير المجالي السليكوني وأكسيد المعدن الى عائلة الترانزيستور ذو التأثير المجالي FET ويتم استخدامه في تطبيقات الوصل/القطع السريعة عند القدرات العالية. وخلافاً لترانزيستور القوى ثنائي القطبية المحكوم بالتيار فإن ترانزيستور MOSFET يحكم بالجهد. وتعرف اطرافه بالمصرف (drain) والمصدر (source) ويتم التحكم في تدفق التيار بين المصرف والمصدر بالجهد بين البوابة والمصدر. ويبين الشكل (9) خاصية الجهد/التيار لترانزيستور MOSFET. فعند جهود المصرف- المصدر الصغير جداً تكون للاداة خاصية المقاومة الثابتة، ولكنه عند جهود المصرف- المصدر الكبيرة تتحدد قيمة التيار بجهد البوابة. وفي تطبيقات القدرة العالية يجب ان يكون جهد المصرف- المصدر صغير جداً لتقليل فقودات التوصيل في حالة التشغيل. ولذلك يتم ضبط جهد البوابة ليكون كبير بقدر كافي لضمان جعل حد تيار المصرف اكبر من قيمة تيار الحمل ومن ضمان عمل الاداة عند حالة المقاومة الثابتة.



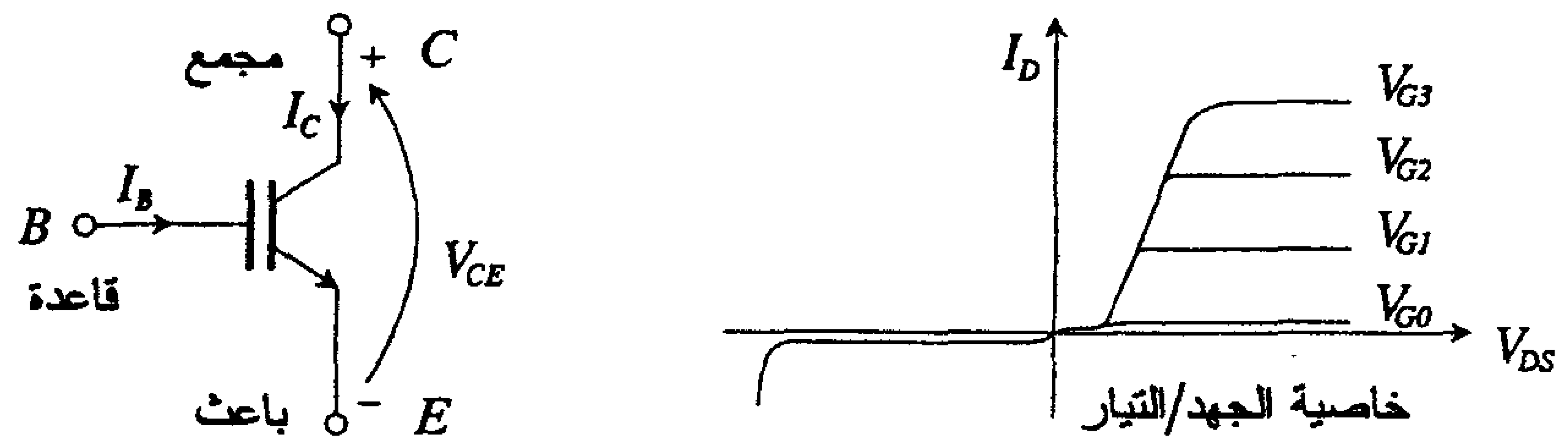
شكل (9) خاصية الجهد المجمع- الباعث/تيار- المجمع للترانزيستور MOSFET.

ويمكن التحكم في ترانزيستور MOSFET مباشرةً بدائرة الكترونية صغيرة مع تقييد تشغيله عند جهود اقل كثراً من الثايرستور، ولكن عند سرعات وصل/قطع عالية جداً. وعند الجهود الاكبر من حوالى V 100 تكون فقودات التوصيل اكبر منها في ترانزيستور القوى والثايرستور، ولكن فقودات الوصل/القطع اقل بكثير جداً. وقياساً بمستويات الجهود والتيارات التي يمكن التعامل معها يأتي ترانزيستور MOSFET في مرتبة متدنية مقارنةً ترانزيستور القوى والثايرستور.

9-2-11 ترانزيستور IGBT:

يعد الترانزيستور ثنائي القطبية معزول البوابة (Insulated Gate BT) او IGBT من ادوات الكترونيات القوى الحديثة نسبياً. وهو يجمع بين امكانية مناولة القدرات العالية لترانزيستور القوى وميزة التحكم بواسطة جهد بوابة ترانزيستور MOSFET. ويبين الشكل (10) خاصية الجهد/التيار لترانزيستور IGBT حيث تكون خصائص المجمع- الباعث شبيهة بترانزيستور القوى وخصائص التحكم شبيهة بترانزيستور MOSFET. وبشكل

عام يشبه ترانزيستور IGBT ترانزيستور القوى باستثناء ان التحكم فيها يتم بواسطة بتسليط جهد على البوابة بدلاً من تدفق التيار في القاعدة لترانزيستور القوى. وعادةً ما تكون معاوقة بوابة التحكم لترانزيستور IGBT كبيرة جداً مما يجعل تيار البوابة صغير جداً. ولكون عملية التحكم في ترانزيستور IGBT تتم بتسليط جهد على البوابة يؤدي الى تدفق تيار بوابة صغير جداً، يمكنه اتمام عملية الوصل/القطع بسرعة كبيرة جداً مقارنة بترانزيستور القوى. ولذلك تستخدم ترانزيستور IGBT في التطبيقات عالية القدرة ذات التردد العالي.

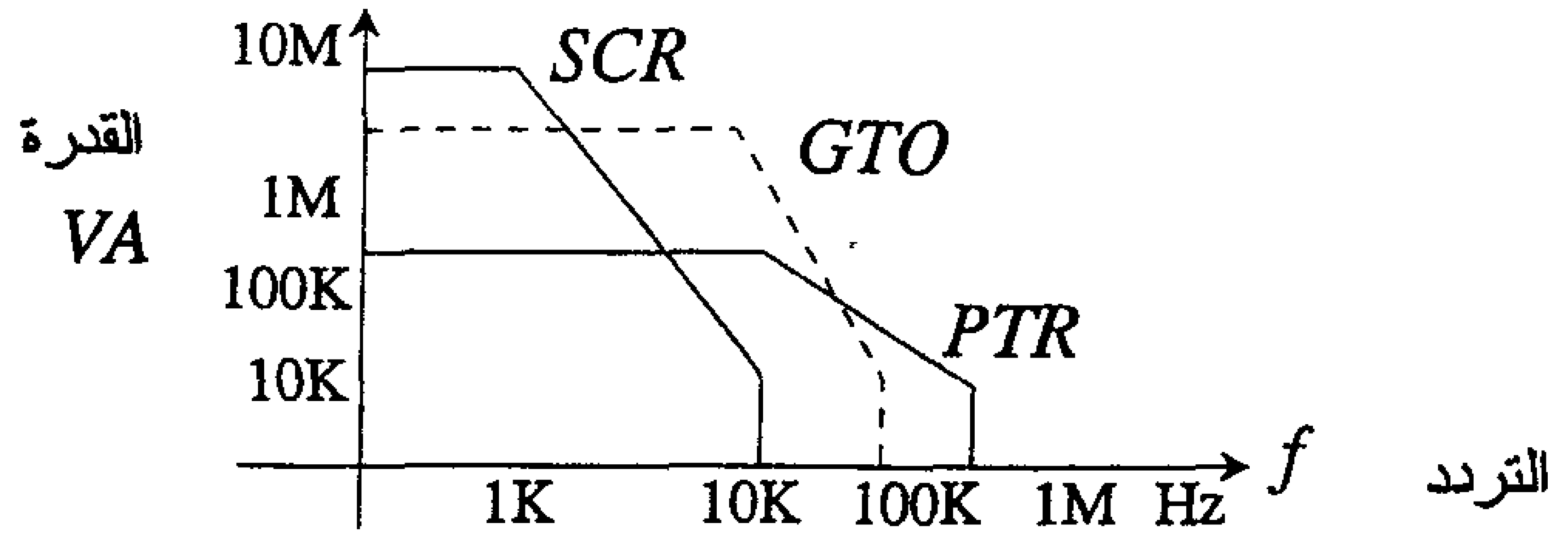


شكل (10) خاصية الجهد المجمع- الباعث/تيار- المجمع للترانزيستور IGBT.

10-2-11 مقارنة قدرة وسرعة ادوات الكترونيات القدرة:

يبين الشكل (11) مقارنة بين السرعات النسبية للوصل/القطع والقدرات الممكن مناولتها لكل من ثايرستور SCR وثايرستور GPT وترانزيستور القوى PTR. ومن الواضح ان ثايرستور SCR بامكان العمل عند قدرات كبيرة مقارنة بالبقية. وبامكان ثايرستور GTO ان يعمل عند قدرات كبيرة قريبة من ذلك ولكن بسرعة اكبر بكثير من سرعة ثايرستور SCR. وأخيرا يتضح ان ترانزيستور القوى يستطيع مناولة قدرات اقل من أي من الثايرستورين ولكنه يمكنه اتمام عملية

الوصل/القطع بسرعة تصل الى عشرة اضعاف سرعة الثايرستورين. وتجدر الاشارة الى وجود انواع حديثه اخرى من ادوات الكترونيات القدرة التي لم يتم تناولها ومن اهمها ثايرستور اكسيد المعدن السليكوني المحكوم (MOS Controlled Thyristor) او ثايرستور MCT الذي يجمع بين خواص التحمل لثايرستور GTO وخواص التحكم لترانزيستور MOSFET.



شكل (11) خاصية القدرة/التردد لبعض الادوات الالكترونية.

3-11 تصنيف وتقييم مفاتيح ودوائر الكترونيات القوى:

غالباً ما يتم استخدام ادوات الكترونيات القوى في الحياة العملية في دوائر الكترونيات القدرة كمفاتيح في نمط الوصل/القطع. وفي المفتاح المحكوم يتم الوصل/القطع بتطبيق اشارة التحكم على بوابة الثايرستور او قاعدة الترانزيستور حيث يتم الحصول على الشكل المطلوب لخرج المفتاح بتغيير فترة وصله وقطعه. ولتميزها عن المفاتيح العادية تسمى مفاتيح ادوات الكترونيات القوى بمفاتيح اشباه الموصلات الساكنة (static switches) والتي يمكن تصنيفها وفقاً لامكانياتها كما يلي:

1 – مفاتيح غير محكومة التشغيل والإطفاء او الوصل/القطع مثل الدايود.

2 – مفاتيح محكومة التشغيل وليست محكومة القطع مثل ثايرستور SCR.

3 - مفاتيح محكومة التشغيل والإطفاء مثل ثايرستور GTO والترانزيستور.

4 – مفاتيح احادية اتجاه الوصل مثل الدايود والثايرستورات والترانزيستورات.

5 – مفاتيح ثنائية اتجاه الوصل لتوصيل التيار في الاتجاهين مثل الدياك والترياك.

ويمكن تمثيل المفتاح الساكن أي كان نوعه كما في الشكل (12) حيث يشترط في المفتاح الساكن المثالي ما يلي:

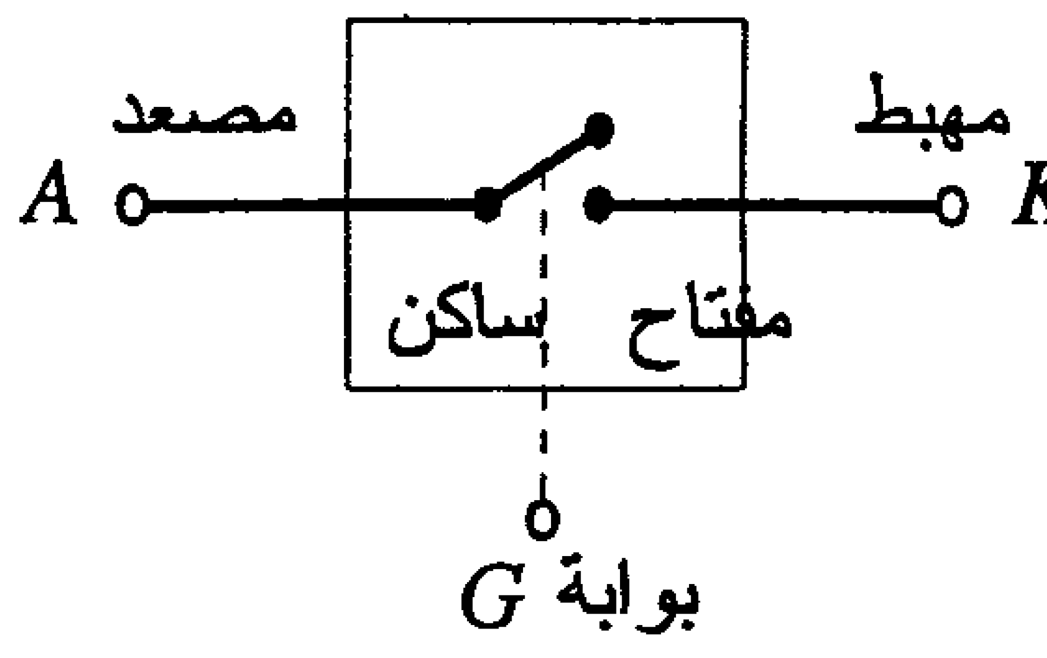
1 – عدم وجود فقودات في وضعي الوصل والقطع.

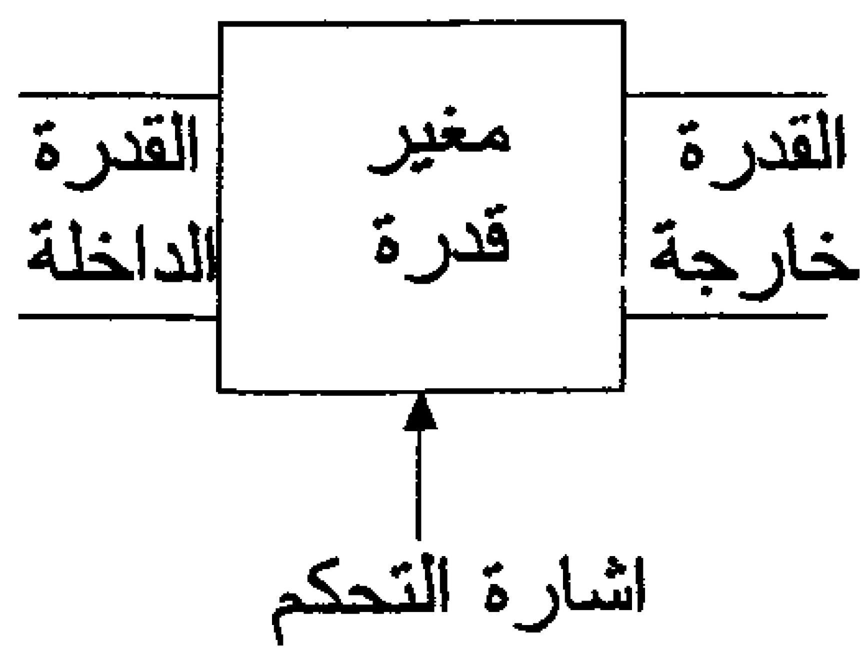
2 – عدم وجود هبوط جهد عبر المفتاح اثناء الوصل.

3 – القدرة المقننة الكافية لمناولة جهود وتيارات الدائرة.

4 – عدم الحاجة لقدرة كبيرة لإتمام عملية الوصل والقطع.

5 – السرعة العالية والكافية لاتمام عمليات الوصل والقطع.





شكل (12) تمثيل المفتاح الساكن ومغير القدرة.

وتستخدم دوائر الكترونيات القوى اساساً للتحكم في القدرة الكهربائية او لتكييف هذه القدرة حيث يتطلب ذلك تغير الق درة الكهربائية من صورة الى اخرى باستغلال خصائص الوصل/القطع لادوات الكترونيات القوى. وتسمى دوائر الكترونيات القوى المستخدمة لتغير صور القدرة الكهربائية بشكل عام بمغيرات القدرة الساكنة (Static power converters) حيث يمكن تصنيف هذه الدوائر او المغيرات الى خمسة انواع كما يلي:

1 – مغيرات القدرة من التيار المتردد الى التيار المستمر (AC to DC converters) وهي تعرف بالمقومات (Rectifiers). ويمكن ان تكون هذه المقومات غير محكومة تعتمد على استخدام الدايود وتغير الجهد المتردد الى جهد مستمر ثابت، او محكومة تعتمد على استخدام الثايرستور وتغير الجهد المتردد الى جهد مستمر متغير. وفي الحالتين يمكن ان يكون مصدر الجهد المتردد المغذي للمقوم احادي او ثلاثي الطور.

2 – مغيرات قدرة التيار المتردد من مستوى جهد الى آخر (AC to AC converters) وهي تعرف بحاكمات الجهد المتردد (AC voltage controllers). وهي مغيرات محكومة تستخدم لتغير الجهد المتردد الثابت الى جهد متردد متغير في النظم احادية او ثلاثية الطور ومن اهم الادوات المستخدمة في هذه المغيرات الترياك.

3 - مغيرات جهد قدرة التيار المستمر من مستوى جهد الى آخر (DC to DC converters) وهي تعرف بمقطعات التيار المستمر (Choppers). وهي مغيرات محكومة تستخدم لتغير الجهد المستمر الثابت الى جهد مستمر متغير في نظم التيار المستمر. ومن

اهـم الادوات المسـتخدمة في هـذه المغـيرات الثايرسـتور وترانزيسـتور القوى.

4 - مغيرات القدرة من التيار المستمر الى التيار المتردد (DC to AC converters) وهـي تعـرف بالعاكسـات (Inverters). وهـي مغـيرات محكومـة تسـتخدم لـتغير الجهـد مسـتمر الثابـت الى جهـد متردد متغير وذو تردد ثابت او متغير احادي او ثلاثي الطور. ومن اهـم الادوات المستخدمة في هذه المغيرات الثايرستور وترانزيستور القوى.

5 - مغيرات قدرة التيار المتردد من مستوى جهد وتـردد الى آخـر (AC to AC converters) وهـي تعـرف بمغيرات الـدورة للجهـد المتردد (AC Cycloconverter). وهـي مغيرات محكومة تستخدم لتغير الجهد المتردد الثابت وبتردد ثابت الى جهد متردد متغير جهده وتـردده في النظم احادية او ثلاثية الطور.

1-3-11 تقييم اداء دوائر الكترونيات القوى:

يتضـح ممـا سبق ان دوائـر الكترونيـات القـوى بمختلـف انواعهـا وتطبيقاتها ستؤثر عنـد تغييرهـا للقـدرة مـن أي مصـدر وتغـذيتها للحمولـة في الاشكال الموجية لجهود وتيارات الدخل والخرج لمغير القـدرة. وكمـا تحدد هذه التأثيرات اداء المغيرات فـإن اثارهـا قـد تتعـدى دائـرة المغـير الى منظومـة القـوى المغذيـة لـه. وتتميـز الاشـكال الموجيـة الحادثـة في دوائـر الكترونيات القوى في الحالة الثابتة (steady-state) بأنها دورية بـزمن دوري T غالباً ما يكون 2π او π حيث $f(t)=f(t+T)$.

ويمكن وصف موجة الجهد والتيار المترددة لمغيرات القدرة بدلالة القيمـة المتوسـطة (المسـتمرة) والقيمـة الفعالـة (المـترددة) للدالـة. ويمكـن

ايجاد القيمة المتوسطة (المستمرة) I_{av} لموجة التيار $i(t)$ كدالة دورية في الزمن بتردد زاوي ω بقسمة المساحة المحصورة بين منحنى الدالة ومحور الزمن (تكامل الدالة) عبر دورة كاملة على الزمن الدوري T كما يلي:

$$I_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,d(t) = \frac{1}{T}\int_0^T i(\omega t)\,d(\omega t) \qquad (11.1)$$

وتمثل القيمة الفعالة لموجة الدالة الدورية للتيار المتردد $i(t)$ بقيمة جذر متوسط المربعات rms (root mean square) وهي القيمة التي تكافئ التيار المستمر الثابت الذي يعطي نفس القدرة المتوسطة i^2R في مقاومة محددة R. وتعطى قيمة جذر متوسط المربعات (ج.م.م) للتيار I_{rms} بالجذر التربيعي لحاصل قسمة تكامل مربع الدالة على الزمن الدوري كما يلي:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,d(t)} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(\omega t)\,d(\omega t)} \qquad (11.2)$$

وتكون القيمة المتوسطة لأي دالة دورية ذات تجانس نصف موجي حيث $f(t)=-f(t+½T)$ مثل الدالة الجيبية صفراً عبر الدورة الكاملة. وفي الدالة الدورية المترددة غير المتجانسة حول محور الزمن (حيث النصف السالب للموجة لا يساوى معكوس النصف الموجب) يستدل على مدى ابتعاد الشكل الموجي للدالة عن الشكل المتجانس بعامل الشكل FF (form factor) الذي يعطى بنسبة القيمة الفعالة ج.م.م الى القيمة المتوسطة (والتي تحسب للدالة الجيبية عبر نصف موجة فقط) كما يلي:

$$FF = \frac{rms\ value}{average\ value} = \frac{I_{rms}}{I_{av}} \qquad (11.3)$$

وبالنظر الى القيمة الفعالة I_{rms} لموجة الدالة الدورية للتيار المتردد $i(t)$ على انها تتكون من مركبة متوسطة I_{av} ومركبة تموج مترددة I_{ac} يستدل على مقدار التموج في الشكل الموجي للدالة بعامل التموج (ripple factor) RF الذي يعرف كما يلي:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{av}^2 + I_{ac}^2}\,, \qquad I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{av}^2} \qquad (11.4)$$

$$RF = \frac{ac\ value}{av.\ value} = \frac{I_{ac}}{I_{av}} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{av}^2}\,/\,I_{av} = \sqrt{FF^2 - 1} \qquad (11.5)$$

وإذا كانت V_{dc} و I_{dc} القيم المستمرة المتوسطة و V_{rms} و I_{rms} قيم ج.م.م لجهد وتيار الحمل (الخرج) لمغير القدرة يمكن التعبير عن القدرة الخارجة المستمرة المتوسطة P_{dc} والقدرة الخارجة المترددة P_{rms} والقدرة الداخلة P_{sac} كما يلي:

$$P_{dc} = V_{dc}\, I_{dc}\,, \qquad P_{rms} = V_{rms}\, I_{rms}\,, \quad P_{sac} = V_s\, I_{rms} \qquad (11.6)$$

ومن ذلك تحسب نسبة التقويم (rectification ratio) RR والتي تعرف كذلك بالكفاءة (efficiency) η التي يتم بها تحويل قدرة التيار المتردد الى قدرة تيار مستمر في دوائر التقويم، مع اهمال مقاومة اداة الكترونيات القوى المستخدمة، كما يلي:

$$\eta = RR = \frac{dc\ power\ output}{ac\ power\ output} = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{V_{dc}\, I_{dc}}{V_{rms}\, I_{rms}} \qquad (11.7)$$

واذا كانت القدرة المتوسطة الخارجة P_{dc} تتطلب قدرة فعالة P_{sac} من مصدر التيار المتردد ويمثله الجانب الثانوي لمحول التغذية، يمكن التعبير عن مدى استغلال مقنن قدرة المحول المطلوب بمعامل الانتفاع (utilization factor) UF للمحول. وهو يعطى بنسبة القدرة

المستمر المتوسطة الخارجة الى الحمولة الى القدرة المقننة المطلوبة في المحول وكما يلي:

$$UF = \frac{dc\ power\ output}{ac\ power\ input} = \frac{P_{dc}}{P_{sac}} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_s I_{rms}} \qquad (11.8)$$

وفي المقوم المثالي على سبيل المثال يجب ان تكون مركبة التيار المتردد في الخرج صفراً. وبذلك يجب ان يكون كل من عامل الكفاءة وعامل الانتفاع واحد (100%) وان يكون كل من عامل الشكل وعامل التموج صفراً.

11-3-2 التحليل التوافقي لأداء دوائر الكترونيات القوى:

غالباً ما يكون الشكل الموجي لخرج دوائر مغيرات الكترونيات القوى لا جيبية وتضم ما يعرف بالتوافقيات (harmonics). ويمكن معرفة التشوه التوافقي في الدالة الدورية بمتسلسلة فورير (Fourier series) التي تعبر عن الدالة الدورية المشوهة للتيار $i(t)$ مثلاً بقيمة متوسطة I_{dc} ومركبات جيبية ذروتها i_{mn} تضم مركبة اساسية i_{m1} بنفس التردد الاساسي للدالة ومركبات توافقية لانهائية بترددات تساوي المضاعفات الصحيحة لتردد الدالة حيث يدل مضاعف التردد على رتبة التوافقية وكما يلي:

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \qquad (11.9)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t)\cos(n\omega t)\, d(\omega t)\, , b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t)\sin(n\omega t)\, d(\omega t) \qquad (11.10)$$

وللدوال المتجانسة ستضم متسلسلة فورير حدود الجيب فقط للدول الفردية، والمتوسط وحدود جيب التمام للدوال الزوجية، والحدود الفردية فقط للدوال نصف الموجية المتاوبة، والحدود الزوجية فقط للدوال نصف الموجية المستمرة وكما يلي:

$$i(\omega t) = -i(-\omega t) \quad \Rightarrow \quad i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t$$ (دالة فردية متجانسة حول نقطة الاصل)

$$i(\omega t) = i(-\omega t) \quad \Rightarrow \quad i(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t \qquad (11.11)$$ (دالة زوجية متجانسة حول محور ص)

$$i(\omega t) = -i(\omega t+\pi) \quad \Rightarrow \quad n=1,3,5,7,\ldots\infty$$ (دالة نصف موجية فردية)

$$i(\omega t) = i(\omega t+\pi) \quad \Rightarrow \quad n=2,4,6,8,\ldots\infty \qquad (11.12)$$ (دالة نصف موجية زوجية)

ويمكن التعبير عن القيمة الفعالة للتيار المتردد اللاجيبي كمحصلة للمركبة المستمرة والمركبات الجيبية $I_{sn}=I_{mn}/\sqrt{2}$ كما يلي:

$$I_s = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{s(rms)}^2} = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{s1}^2 + I_{s2}^2 + I_{s3}^2 + I_{s4}^2 + \ldots + I_{s\infty}^2} \qquad (11.13)$$

وتتطلب بعض دوائر الكترونيات القوى مثل العاكسات توليف (synthesize) الموجة الجيبية لجهد الخرج المتردد من موجات متقطعة مثل النبضات. ويتم تقييم جودة الموجة الناتجة في هذه الحالة بالمحتوى التوافقي في الشكل الموجي والذي يقاس بالتشوه التوافقي الكلي THD في الموجة الذي يمثل نسبة مجموع التوافقيات العليا I_{sh} الى المركبة الاساسية I_{s1} كما يلي:

$$I_{sh} = \sqrt{I_{s2}^2 + I_{s3}^2 + I_{s4}^2 + ... + I_{s\infty}^2} = \sqrt{I_{s(rms)}^2 - I_{s1}^2}$$
(11.14)

$$THD = I_{sh} / I_{s1} = \sqrt{(I_{s(rms)}^2 - I_{s1}^2)} / I_{s1}$$
(11.15)

ويدل التشوه التوافقي الكلي، وقيمته المثلى صفر، على مدى ابتعاد الشكل الموجى عن الشكل الجيبي النقي المفترض للدالة الذي يمثله المركبة الاساسية. وبينما يمثل THD المحتوى التوافقي الكلي فهو لا يدل على مستوى كل مركبة توافقية. ويتطلب تقييم مدى فعالية وسائل خفض التوافقيات غير المرغوبة الاخذ في الاعتبار بمقدار وتردد كل توافقية. ويستدل على ذلك بعامل التشوه التوافقي HDF الذي يمثل نسبة مجموع عوامل تشوه كل توافقية HDF_n الى تيار المركبة الاساسية كما يلي:

$$HDF_n = \frac{1}{I_{s1}}\left(\frac{I_{sn}}{n^2}\right), \quad HDF = \sum_{n=2}^{\infty} HDF_n = \frac{1}{I_{s1}} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_{sn}}{n^2}$$
(11.16)

وتعرف الزاوية بين المركبة الاساسية لتيار الدخل والمركبة الاساسية لجهد الدخل بزاوية الازاحة ϕ والتي يعرف جيب تمامها بعامل الازاحة (displacement factor) DF. ومن ذلك يمكن التعبير عن قدرة المركبات الاساسية P_{s1} كما يلي:

$$DF = \cos \phi \tag{11.17}$$

$$P_{s1} = V_{s1}\, I_{s1} \cos \phi \tag{11.18}$$

وغالباً ما يكون جهد المصدر جيبياً ولا يضم سوى المركبة الاساسية ومن ثم تكون قدرة التوافقيات الاعلى للتيار صفراً وتكون

القدرة المتوسطة المسحوبة من المصدر P_{S1} حيث يمكن التعبير عن معامل قدرة الدخل PF كما يلي:

$$PF = P_{S1}/S_S = V_{S1}I_{S1}\cos\phi/V_SI_S = (I_{S1}/I_S)\cos\phi \quad (11.19)$$

ومن العوامل المستخدمة في التحليل التوافقي للاشكال الموجية غير الجيبية العامل التوافقي (harmonic factor) HF حيث:

$$HF = \sqrt{(I_s^2 - I_{s1}^2)/I_{s1}^2} \quad (11.20)$$

11-4 المقومات غير المحكومة مع احمال مقاومية:

تستخدم المقومات غير المحكومة التي تقوم اساساً على الدايود في تغير القدرة ذات التيار المتردد الى قدرة تيار مستمر بجهد ثابت لتغذية بعض الاحمال التي لا تتطلب جهداً مستمراً ذو جودة عالية بقدر ما تتطلب جهداً ذو قيمة متوسطة ثابتة. ويكفي في دوائر تقويم القدرة ذات التردد 50-60 Hz استخدام الدايود العادية ذات ازمنة التشغيل الكبيرة نسبياً مقارنة بأدوات الكترونيات القدرة الاخرى. وفي جميع الاحوال يشترط في المقوم المثالي بالإضافة الى انخفاض تكلفته ما يلي:

1 – الكفاءة العالية للمقوم والاستغلال الامثل للدايودات والمحولات المستخدمة.

2 – انخفاض تموجات الجهد المستمر الخارج وكذلك انخفاض تنظيم هذا الجهد.

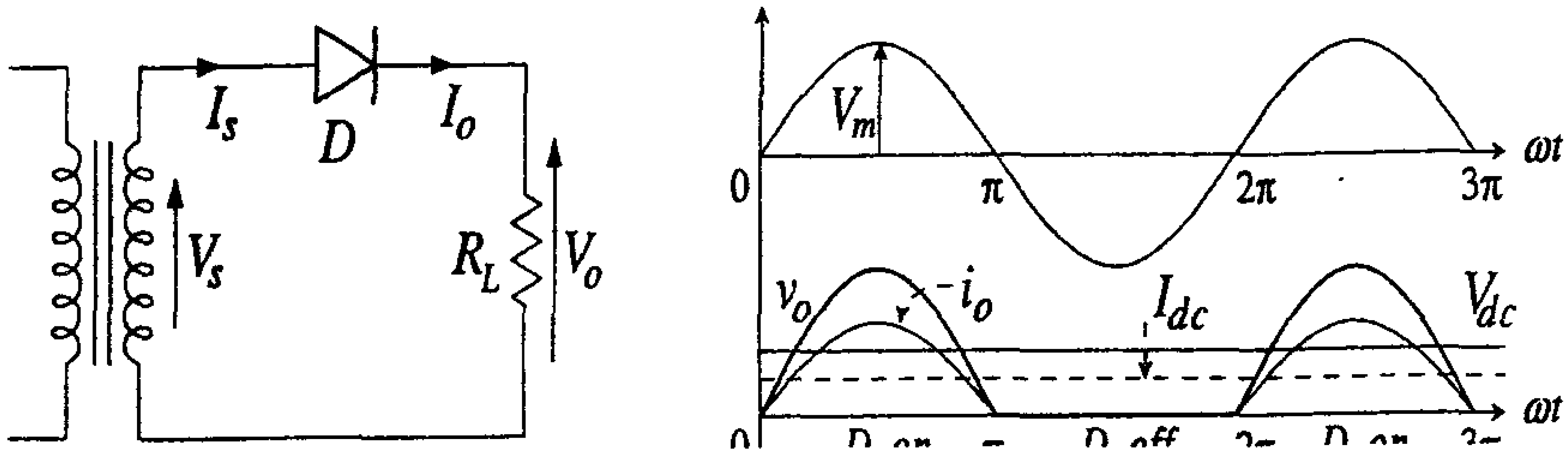
3 - عدم وجود مركبات جهد تيار مستمر في ملفات المحولات المغذية للمقومات.

4 – انخفـــاض التشـــوه التـــوافقي في تيـــار الـــدخل والتـــداخلات الكهرومغناطيسية الناتجة.

وتصنف المقومات وفقاً الشكل الموجي لجهد الخرج الى مقومات نصف موجة تعمل فيها الدايودات في النصف الموجب لموجة جهد الدخل فقط، ومقومات موجة كاملة تعمل فيها الدايودات في النصفين الموجب والسالب لموجة جهد الدخل. كما تصنف هذه المقومات وفقا لمصدر التغذية الى مقومات احادية او متعددة الاطوار.

1-4-11 مقوم نصف الموجة احادي الطور:

تمثل مقومات نصف الموجة اجادية الطور ابسط انواع المقومات ودوائر الكترونيات القوى بشكل عام. ويبين الشكل (13) الدائرة المكافئة لمقوم نصف الموجة احادي الطور والشكل الموجي لجهد المصدر V_S وجهد وتيار الخرج V_O و I_O. وسيشتغل الدايود ويبدأ في التوصيل بمجرد ان يصبح جهود المصعب موجباً بالنسبة للمهبط حيث يستمر ذلك طيلة النصف الموجب لموجة جهد المصدر ويكون الدايود في انحياز امامي، ويتوقف التوصيل في النصف السالب للموجة حيث يكون الدايود في انحياز عكسي وجهد المصعد سالباً بالنسبة للمهبط. ويجدر بالذكر ان تيار تسرب صغيراً جداً مقارنة بتيار الحمولة سيسري عبر الدايود في الانحياز العكسي حيث يمكن اهمال هذا التيار واعتباره صفراً.



شكل (13) مقوم نصف الموجة الدايودي احادي الطور مع حمل مقاومي.

وبإهمال هبوط الجهد في الدايود يمكن من المعادلتين (1) و (2) ايجاد قيم الجهد المستمر Vdc وج.م.م $Vrms$ في جهد الخرج Vo لمقوم نصف الموجة الدايودي (غير المحكوم) والمبين في الشكل (13) كما يلي:

$$v_O = V_m \sin \omega t \ ,0 \le \omega t \le \pi ,v_O = 0 \ ,\pi \le \omega t \le 2\pi \qquad (11.21)$$

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\left\{\int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \, d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \, d(\omega t)\right\} = \frac{V_m}{\pi} = 0.31831 \ V_m = 0.45016 \ V_s \qquad (11.22)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left\{\int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \, d(\omega t)\right\}} = \frac{V_m}{2} = 0.5 \ V_m = 0.70711 \ V_s \qquad (11.23)$$

وبذلك يمكن من المعادلتين (3) و (5) ايجاد كل من عامل الشكل FF وعامل التموج RF لمقوم نصف الموجة كما يلي:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_m/2}{V_m/\pi} = \frac{\pi}{2} = 1.57080 \qquad (11.24)$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{(\pi/2)^2 - 1} = 1.21136 \qquad (11.25)$$

ويمكن من المعادلة (6) ايجاد كل من القدرة الخارجة المستمرة P_{dc} والمترددة P_{rms} وقدرة الدخل المترددة الداخلة من المحول P_{sac} مع ملاحظة ان تيار ج.م.م الدخل لمقوم نصف الموجة يساوي تيار ج.م.م الخرج $(I_s=I_{rms})$ كما يلي:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_L} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R_L} = \frac{2V_s^2}{\pi^2 R_L} \qquad (11.26)$$

$$P_{rms} = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{V_m^2}{4R_L} = \frac{V_s^2}{2R_L} \qquad (11.27)$$

$$P_{sac} = V_s I_s = \frac{V_m V_{rms}}{\sqrt{2}R_L} = \frac{V_m^2}{2\sqrt{2}R_L} = \frac{V_s^2}{\sqrt{2}R_L} \qquad (11.28)$$

ومن ثم يمكن من المعادلتين (7) و (8) ايجاد قيم كفاءة التقويم η وعامل الانتفاع UF لمقوم نصف الموجة الدايودي كما يلي:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \frac{4R_L}{V_m^2} = \frac{4}{\pi^2} = 0.40528 \qquad (11.29)$$

$$UF = \frac{P_{dc}}{P_{sac}} = \frac{V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \frac{2\sqrt{2}R_L}{V_m^2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} = 0.28658 \qquad (11.30)$$

كما يتضح من الشكل الموجي للجهد في الشكل (13) ان الجهد العكسي الاعظم الذي سيتعرض له الدايود هو $PRV = V_m$.

11-4-2 مقوم الموجة الكاملة احادي الطور:

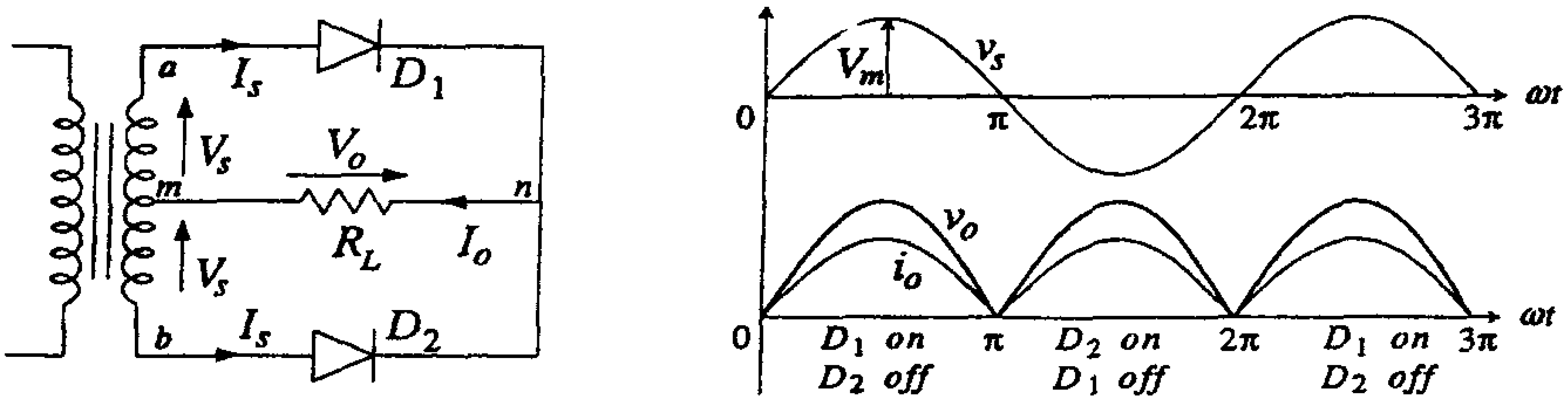
يعيب مقومات نصف الموجة انخفاض كفاءة التقويم ومعامل الانتفاع بالمحول وارتفاع معامل التموج لكونها تقوم على تقويم النصف الموجب فقط لجهد الدخل وهو ما يجعلها محدودة الاستخدام في الحياة العملية. ولذلك تعد مقومات الموجة الكاملة والتي تقوم على تقويم

نصفي موجة جهد الدخل في اتجاه واحد. ويوجد نوعان لمقومات الموجة الكاملة هما مقوم المآخذ النصفي (center-tap) ومقوم القنطرة (bridge).

ويبين الشكل (14) الدائرة المكافئة لمقوم المآخذ النصفي الذي يضم دايودين متماثلين ويستخدم نقطة توصيل في منتصف الملف الثانوي لمحول التغذية كمآخذ نصفي. وفي هذا المقوم يعمل كل واحد نصفي لفائف المحول مع الدايود المتصل به كمقوم نصف موجة في احد نصفي الموجة ويعمل النصف الثاني لملف المحول في النصف الثاني لموجة جهد الدخل. ففي النصف الموجب للشكل الموجي لجهد الدخل حيث تكون النقطة a موجبة بالنسبة للنقطة b سيعمل الدايود $D1$ لكونه في انحياز امامي. وعند اهمال هبوط الجهد عبر الدايود $D1$ سيكون جهد النقطة n مثل النقطة a موجباً بالنسبة لنقطة المنتصف m وهو ما يجعل الدايود $D2$ في انحياز عكسي ومن ثم متوقفاً عن العمل. ويستمر تدفق تيار الدايود $D1$ من النقطة n عبر مقاومة الحمولة R_L الى نقطة المنتصف m طيلة النصف الموجب لموجة الجهد.

وفي النصف السالب للشكل الموجي لجهد الدخل حيث تكون النقطة b موجبة بالنسبة للنقطة a سيعمل الدايود $D2$ لكونه في انحياز امامي. وعند اهمال هبوط الجهد عبر الدايود $D2$ سيكون جهد النقطة n مثل النقطة b موجباً بالنسبة لنقطة المنتصف m وهو ما يجعل الدايود $D1$ في انحياز عكسي ومن ثم متوقفاً عن العمل. ويستمر تدفق تيار الدايود $D2$ من النقطة n عبر مقاومة الحمولة R_L الى نقطة المنتصف m طيلة النصف السالب لموجة الجهد. وبذلك سيواصل تيار الخرج (الحمولة) التدفق في نفس الاتجاه لكل من النصف الموجب والنصف

السالب للشكل الموجي لجهد الدخل وكما هو مبين في الشكل (14) حيث:



شكل (14) مقوم المآخذ النصفي للموجة الكاملة احادي الطور مع حمل مقاومي.

$$\left.\begin{aligned} v_{d1} &= V_m \sin \omega t \\ v_{d2} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad 0 \leq \omega \leq \pi \qquad (11.31)$$

$$\left.\begin{aligned} v_{d1} &= 0 \\ v_{d2} &= -V_m \sin \omega t \end{aligned}\right\} \quad \pi \leq \omega \leq 2\pi \qquad (11.32)$$

وبإهمال هبوط الجهد في الدايودات يمكن من المعادلتين (1) و (2) ايجاد قيم الجهد المستمر V_{dc} وجهد ج.م.م V_{rms} في جهد الخرج V_O لمقوم الموجة الكاملة الدايودي (غير المحكوم) والمبين في الشكل (14) كما يلي:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\left\{ \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t\, d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} -V_m \sin \omega t\, d(\omega t) \right\}$$

$$= \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin \omega t\, d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} = 0.63662\ V_m = 0.90032\ V_s \qquad (11.33)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\left\{\int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t\, d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t\, d(\omega t)\right\}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t\, d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.70711\ V_m = V_s \qquad (11.34)$$

وبـذلك يمكـن مـن المعـادلتين (3) و (5) ايجـاد كـل مـن عامـل الشـكل FF وعامل التموج RF لمقوم الموجة الكاملة كما يلي:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{V_m / \sqrt{2}}{2V_m / \pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11072 \qquad (11.35)$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} = 0.48343 \qquad (11.36)$$

ويمكن من المعادلة (6) ايجاد كل من القدرة الخارجة المستمرة P_{dc} والمترددة P_{rms} التي تغذى لحمولة المقوم كما يلي:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_L} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} = \frac{8V_s^2}{\pi^2 R_L} \qquad (11.37)$$

$$P_{rms} = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{V_m^2}{2R_L} = \frac{V_s^2}{R_L} \qquad (11.38)$$

وفي مقوم المآخذ النصفي ينقل كل دايود تيار I_S يغذي به قدرة الخرج المترددة P_{rms} لنصف دورة. كما ان جهد ج.م.م للجانب الثانوي للمحول يساوي مجموع جهدي نصفيه أي $2V_S$. وبذلك يمكن التعبير عن I_S وقدرة المحول المترددة P_{sac} كما يلي:

$$P_{rms} = I_{rms}^2 R_L = 2I_s^2 R_L \quad \Rightarrow \quad I_s = I_{rms} / \sqrt{2}$$
(11.39)

$$P_{sac} = 2V_S I_S = \sqrt{2} V_s I_{rms} = V_m \frac{V_{rms}}{R_L} = \frac{V_m^2}{\sqrt{2} R_L}$$
(11.40)

ومـن ثـم يمكـن مـن المعـادلتين (7) و (8) ايجـاد قـيم كفـاءة التقويم η وعامل الانتفاع UF لمقوم الموجة الكاملة الدايودي كما يلي:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \frac{2R_L}{V_m^2} = \frac{8}{\pi^2} = 0.81057 \qquad (11.41)$$

$$UF = \frac{P_{dc}}{P_{sac}} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \frac{\sqrt{2}R_L}{V_m^2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi^2} = 0.57316 \qquad (11.42)$$

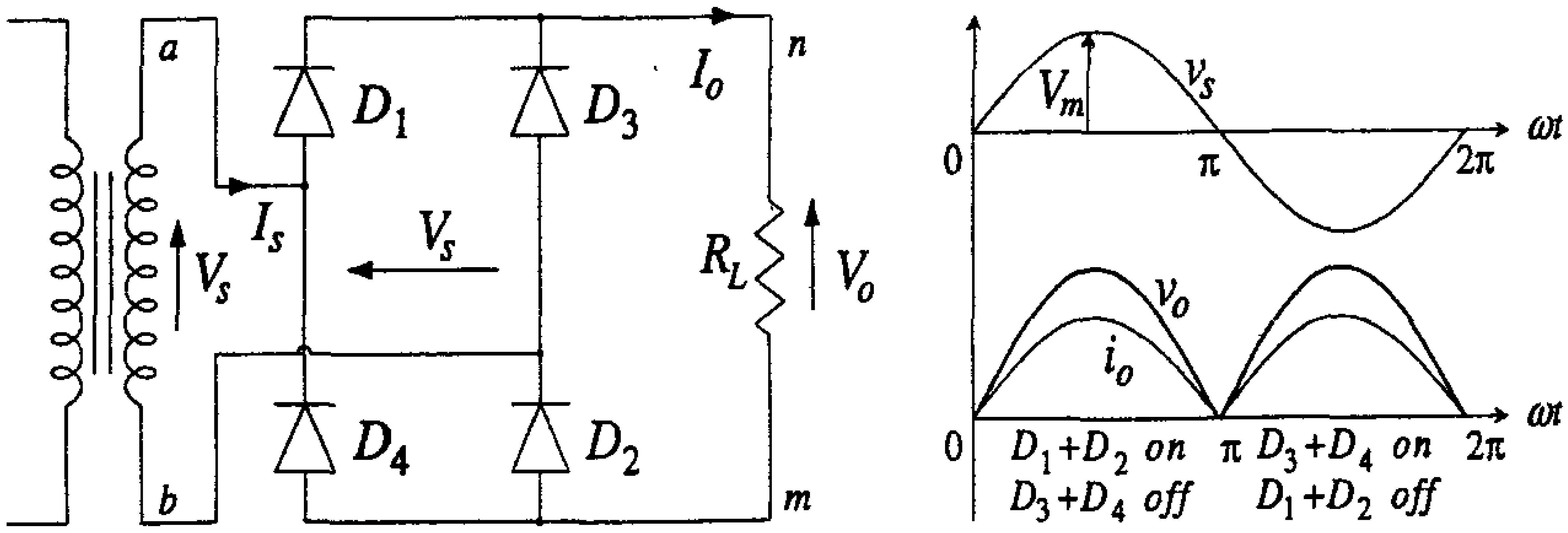
ويتضح من الشكل (14) ان الجهد العكسي الاعظم المطبق على الدايود اثناء توقفه يساوي كامل جهد الثانوي $PRV = 2V_m$.

3-4-11 مقوم القنطرة احادي الطور:

يعيب مقوم المآخذ النصفي انخفاض عامل الانتفاع بالمحول لاستخدامه نصف جهد ثانوي المحول في كل نصف دورة، وارتفاع جهد الانحياز العكسي للدايودات الى ضعف الجهد الاعظم. ويمكن التغلب على هذه العيوب باستخدام مقوم القنطرة الذي يضم اربعة دايودات متماثلة يتم توصيلها في هيئة القنطرة كما في الشكل (15) حيث يستخدم جهد ثانوي المحول كاملاً. ففي النصف الموجب للشكل الموجي لجهد الدخل حيث تكون النقطة a موجبة بالنسبة للنقطة b سيعمل الدايودين $D1$ و $D2$ لكونهما في انحياز امامي، وتكون الدايودين $D3$ و $D4$ في انحياز عكسي ومتوقفة عن العمل لكون جهد النقطة n موجباً مثل a وجهد النقطة m سالباً مثل b. ويذلك يتدفق التيار من a عبر $D1$ الى الحمولة R_L ليعود عبر $D2$ الى b طيلة النصف الموجب.

وفي النصف السالب للشكل الموجي لجهد الدخل تكون b موجبة بالنسبة للنقطة a وتعمل الدايودين $D3$ و $D4$ لكونهما في انحياز امامي بينما تكون الدايودين $D1$ و $D2$ في انحياز عكسي ومتوقفة لكون جهد n موجباً مثل b وجهد m سالباً مثل a. ويتدفق

التيار من b عبر $D3$ الى الحمولة R_L ليعود عبر $D4$ الى a طيلة النصف السالب لموجة الجهد. وبذلك سيتدفق تيار الخرج في نفس الاتجاه (من n الى m) في نصفي موجة جهد الدخل الموجب والسالب وكما هو مبين في الشكل (15).



شكل (15) مقوم القنطرة للموجة الكاملة احادي الطور مع حمل مقاومي.

ويتضح من الشكلين (14) و (15) تطابق الشكل الموجي لجهد وتيار الخرج لمقومي المآخذ النصفي والقنطرة، ولكن القيمة العظمى V_m و ج.م.م V_S لجهد المصدر تمثل كامل جهد ثانوي المحول في مقوم القنطرة ونصفه فقط في مقوم المآخذ النصفي. وبذلك يكون الجهد المستمر V_{dc} وجهد ج.م.م V_{rms} في جهد الخرج V_O لمقوم القنطرة كما تعطى بالمعادلتين (33) و (34). كما يكون عامل الشكل FF وعامل التموج RF لمقوم القنطرة كما تعطى بالمعادلتين (35) و (36) حيث:

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.63662\ V_m\ , V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\ =\ 0.70711\ V_m \quad (11.43)$$

$$FF = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11072\ , RF = \sqrt{FF^2 - 1}\ =\ 0.48343 \quad (11.44)$$

وبذلك تكون القدرة المستمرة P_{dc} والمترددة P_{rms} لخرج مقوم القنطرة كما تعطى بالمعادلتين (37) و (38) مع ملاحظة ان قيم $V_{1.1}$ و V_S تمثل كامل جهد الثانوي وليس نصفه. وسينقل الدايودين العاملين في القنطرة تيار I_S ليغذيان به الحمولة ويسلطان عليها الجهد V_S حيث يكون تيار ج.م.م للخرج والدخل متساويان $(I_S=I_{rms})$ ويمكن التعبير عن قدرة المحول P_{sac} كما يلي:

$$P_{dc} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L}, \qquad P_{rms} = \frac{V_m^2}{2R_L} \qquad (11.45)$$

$$P_{sac} = V_S\, I_S = \frac{V_m I_{rms}}{\sqrt{2}} = \frac{V_m V_{rms}}{\sqrt{2}\, R_L} = \frac{V_m^2}{2R_L} \qquad (11.46)$$

ومن ثم يمكن من المعادلتين (7) و (8) ايجاد قيم كفاءة التقويم η وعامل الانتفاع UF لمقوم القنطرة للموجة الكاملة كما يلي:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \frac{2R_L}{V_m^2} = \frac{8}{\pi^2} = 0.81057 \qquad (11.47)$$

$$UF = \frac{P_{dc}}{P_{sac}} = \frac{4V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \frac{2R_L}{V_m^2} = \frac{8}{\pi^2} = 0.81057 \qquad (11.48)$$

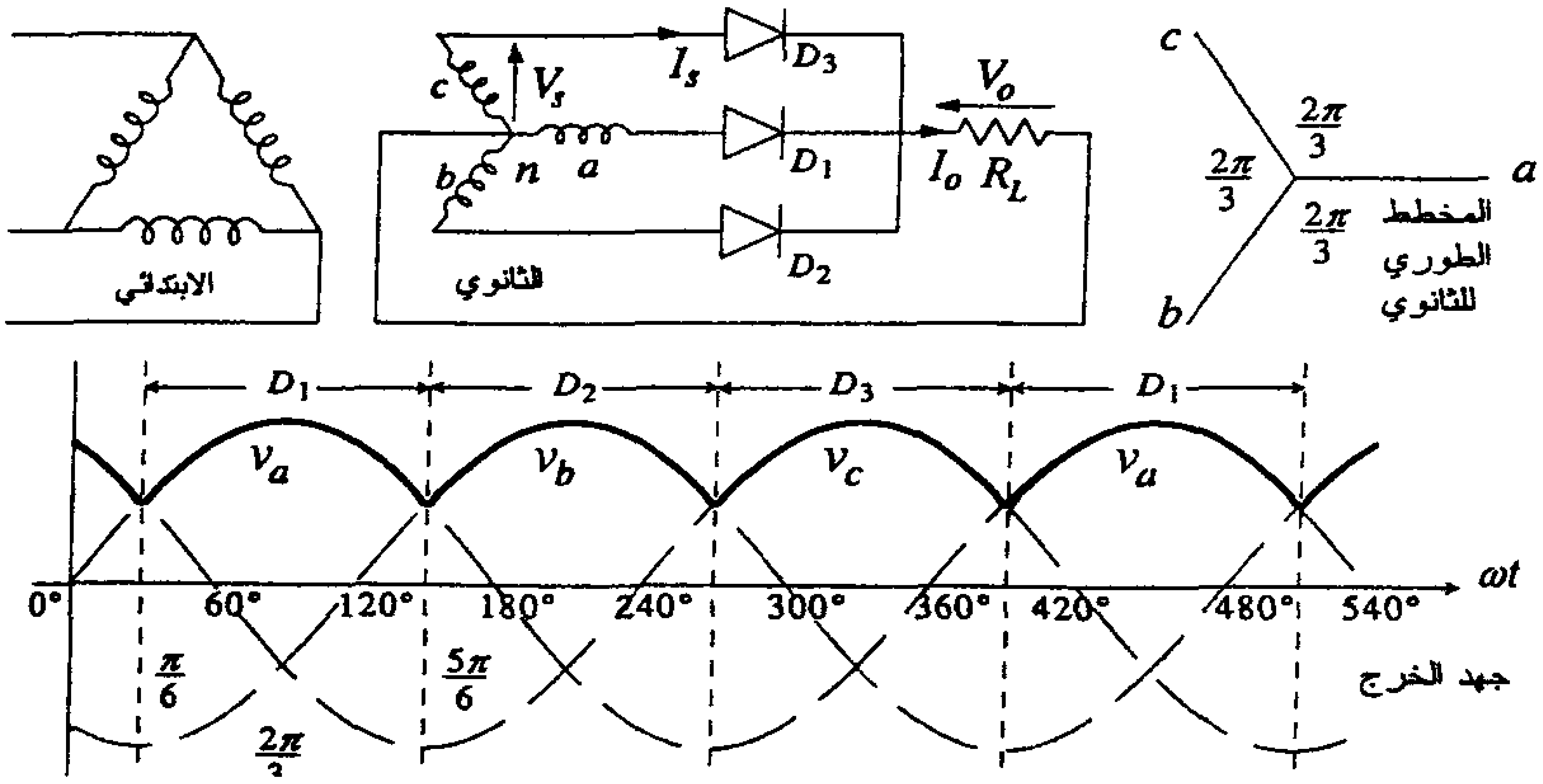
ويتضح من الشكل (15) ان الجهد العكسي الاعظم المطبق على كل دايود اثناء توقفه يساوي جهد الثانوي فقط $PRV = V_m$.

11-4-4 مقوم نصف الموجة ثلاثي الطور:

كما يتضح من المعادلة (43) ان اكبر جهد تيار مستمر يمكن الحصول عليه من المقوم احادي الطور لا يتجاوز 63.7% من القيمة العظمى لجهد الدخل وهو ما يحد من استخدامها لتغذية الاحمال التي تتجاوز حوالى 10 KW. وعادةً ما تستخدم المقومات ثلاثية الطور لتغذية

الاحمال الاكبر. ومن اهم ما يميز المقومات ثلاثية الطور انخفاض التموجات في جهد الخرج، ارتفاع كفاءة التقويم نتيجةً لخفض قدرة الخرج المترددة المهدورة، وتحقيق اتزان اكبر في النظم ثلاثية الطور المستخدمة في نظم التوزيع والنقل. وعادةً ما يتم توصيل لفائف الجانب الابتدائي للمحول المغذي للمقوم ثلاثي الطور على هيئة مثلث للحد من انتقال توافقيات التيار الى المصدر، بينما يتم توصيل لفائف الثانوي على هيئة نجمة لتوفير نقطة الحياد لتمثل مسار العودة لتيار الخرج المستمر.

يبين الشكل (16) مقوم نصف موجة ثلاثي الطور ذو حمل مقاومي والشكل الموجي لجهد الخرج حيث يتضح ان جهد كل طور متصل بمقاومة الحمل عبر دايود خاص به حيث في أي لحظة سيعمل فقط الدايود الاعلى جهداً للمصعد بالنسبة الى نقطة الحياد n ويستمر عمله لزاوية 120^o. فعندما يمر جهد الطور a بقيمته العظمى مثلاً تكون جهود الطورين الآخرين متساوية وسالبة وبذلك سيعمل الدايود D_1. وعند التوصيل سيجعل الدايود D_1 جهد النقطة n مساوياً لجهد الطور a وهو ما يجعل مهبطي الدايودين D_2 و D_3 موجبة اكثر من مصعديها. وبذلك تكون الدايودين D_2 و D_3 في انحياز عكسي ومن ثم متوقفة عن العمل اثناء عمل دايود الطور a الذي يستمر عمله لزاوية 120 بين 30^o الى 150^o. وهكذا يكون الامر للطور الاعلى جهد في الدورات اللاحقة. وباهمال هبوط الجهد في الدايود يمكن من المعادلتين (1) و (2) ايجاد قيم الجهد المستمر V_{dc} وجهد ج.م.م V_{rms} في جهد الخرج V_o لمقوم نصف موجة ثلاثي الطور كما يلي:



شكل (16) مقوم نصف موجة ثلاثي الطور مع حمل مقاومي.

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi/3}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m \sin\omega t\, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m = 0.82699\ V_m = 1.16955\ V_s \qquad (11.49)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/3}\int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_m^2 \sin^2 \omega t\, d(\omega t)} = \sqrt{\frac{4\pi + 3\sqrt{3}}{8\pi}}\, V_m = 0.84068\ V_m = 1.18891\ V_s \qquad (11.50)$$

ويمكن من المعادلتين (3) و (5) ايجاد كل من عامل الشكل FF وعامل التموج RF لمقوم نصف موجة ثلاثي الطور كما يلي:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}\sqrt{\frac{4\pi + 3\sqrt{3}}{8\pi}} = 1.01655 \qquad (11.51)$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} = 0.182701 \qquad (11.52)$$

ويمكن من المعادلة (6) ايجاد كل من القدرة الخارجة المستمرة P_{dc} والمترددة P_{rms} التي تغذى لحمولة المقوم كما يلي:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_L} = \frac{27 V_m^2}{4\pi^2 R_L} = \frac{54 V_s^2}{\pi^2 R_L} \qquad (11.53)$$

$$P_{rms}=V_{rms}I_{rms}\frac{V_{rms}^2}{R_L}=\frac{V_m^2}{R_L}\left(\frac{4\pi+3\sqrt{3}}{8\pi}\right)=\frac{V_s^2}{R_L}\left(\frac{4\pi+3\sqrt{3}}{16\pi}\right)$$
(11.54)

وفي مقوم نصف الموجة ثلاثي الطور سينقل كل دايود اثناء عمله تيار ج.م.م الثانوي للمحول I_S ليغذي به قدرة الخرج المترددة P_{rms} لثلث الدورة. كما ان جهد ج.م.م المسلط على كل دايود يساوي جهد الطور للجانب الثانوي للمحول V_S. وبذلك يمكن التعبير عن I_S وقدرة المحول المترددة P_{sac} كما يلي:

$$P_{rms}=I_{rms}^2R_L=3I_s^2R_L \quad\Rightarrow\quad I_s=I_{rms}/\sqrt{3} \qquad (11.55)$$

$$P_{sac}=3V_S\,I_S=$$

$$3\frac{V_m}{\sqrt{2}}\frac{I_{rms}}{\sqrt{3}}=\frac{\sqrt{3}\,V_mV_{rms}}{\sqrt{2}\,R_L}=\frac{\sqrt{3}\,V_m^2}{\sqrt{2}R_L}\sqrt{\frac{4\pi+3\sqrt{3}}{8\pi}}=\frac{V_m^2}{R_L}\sqrt{\frac{12\pi+9\sqrt{3}}{16\pi}}$$
(11.56)

ويمكن من المعادلتين (7) و (8) ايجاد قيم كفاءة التقويم η وعامل الانتفاع UF لمقوم نصف الموجة ثلاثي الطور كما يلي:

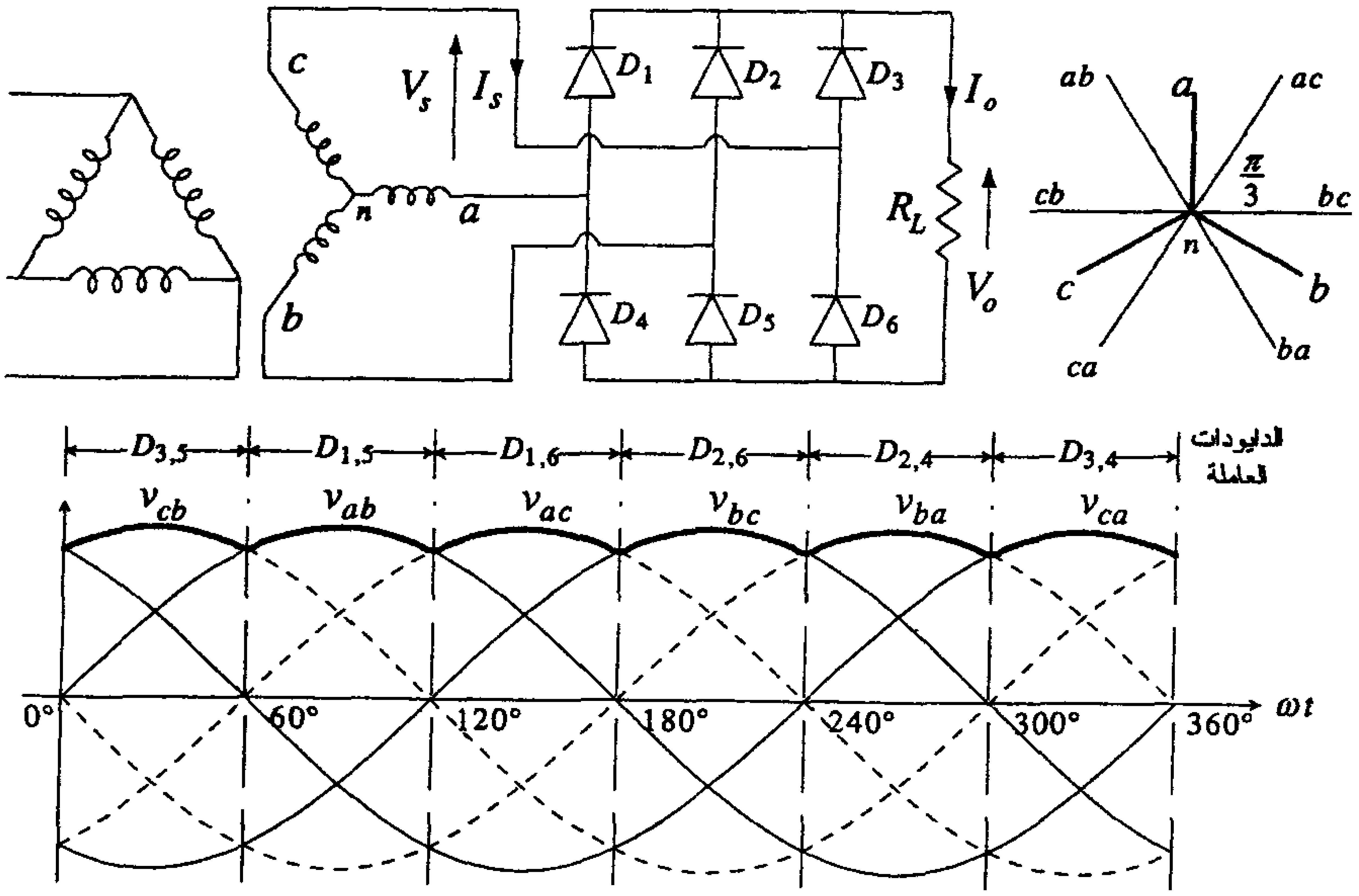
$$\eta=\frac{P_{dc}}{P_{rms}}=\frac{27V_m^2}{4\pi^2R_L}\times\left(\frac{8\pi}{4\pi+3\sqrt{3}}\right)\frac{R_L}{V_m^2}=\frac{54/\pi}{4\pi+3\sqrt{3}}=0.96700$$
(11.57)

$$UF=\frac{P_{dc}}{P_{sac}}=\frac{27V_m^2}{4\pi^2R_L}\times\sqrt{\frac{16\pi}{12\pi+9\sqrt{3}}}\frac{R_L}{V_m^2}=\sqrt{\frac{729/\pi^3}{12\pi+9\sqrt{3}}}=0.66424$$
(11.58)

ويتضح من الشكل (16) ان الجهد العكسي الاعظم المطبق على الدايود اثناء توقفه يساوي جهد الخط الثانوي $PRV=\sqrt{3}V_m$.

5-4-11 مقوم القنطرة ثلاثي الطور مع حمل مقاومي:

يعيب مقومات نصف الموجة ثلاثي الطور انخفاض عامل الانتفاع بالمحول لاعتمادها على تقويم جهد الطور وليس جهد الخط لثانوي المحول وارتفاع جهد الانحياز العكسي للدايودات الى ضعف الجهد الاعظم للطور. ويمكن التغلب على ذلك باستخدام مقوم القنطرة ثلاثي الطور الذي يضم ستة دايودات متماثلة يتم توصيلها في هيئة القنطرة كما في الشكل (17).



شكل (17) مقوم موجة كاملة قنطرة ثلاثي الطور مع حمل مقاومي.

ويميز مقوم القنطرة بأنه ذو موجة كاملة يقوّم جهد خط بعامل انتفاع عالي للمحول وعند جهد عكسي اعظم منخفض للدايودات. كما يميز مقوم القنطرة ثلاثي الطور توازن تيارات الاطوار الثلاثة في المحول والاستغناء عن نقطة الحياد، الامر الذي يسمح بتوصيل لفائف

المحول كنجمة او مثلث حسب الحاجة. ويمكن توضيح اسس عمل مقوم القنطرة ثلاثي الطور بالنظر دائرة المقوم والمخطط الطوري والشكل الموجي في الشكل (17). وفي أي لحظة ستعمل دايودات الخط الاعلى جهداً ليتدفق التيار من دايود الطور الاعلى جهداً الى الحمولة ويعود عبر دايود الطور الاقل جهداً. ففي الفترة الاولى يكون الخط cb الاعلى جهداً وسيتدفق التيار الى مقاومة الحمولة من الطور c الاعلى جهداً عبر الدايود $D3$ ليعود عبر الدايود $D5$ الى الطور b الاقل جهداً. وفي الفترة الثانية يكون الخط ab الاعلى جهداً وسيتدفق التيار الى مقاومة الحمولة من الطور a الاعلى جهداً عبر الدايود $D1$ ليعود عبر الدايود $D5$ الى الطور b الاقل جهداً. وهكذا يتبين من الشكل (17) ان كل الاطوار الثلاثة a، b، c ستعمل لفترة 120^{o}. وباهمال هبوط الجهد في الدايودات يمكن من المعادلتين (1) و (2) ايجاد الجهد المستمر Vdc وجهد ج.م.م $Vrms$ للخرج لمقوم القنطرة ثلاثي الطور والمبين في الشكل (17) كما يلي:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi/6}\int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m \sin\omega t\, d(\omega t) = \frac{3}{\pi}V_m = 0.95493\,V_m = 1.35047\,V_S \qquad (11.59)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/6}\int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m^2 \sin^2\omega t\, d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}}\;V_m = 0.9557\,V_m = 1.35166\,V_S \qquad (11.60)$$

ويمكن من المعادلتين (3) و (5) ايجاد كل من عاملي الشكل FF والتموج RF لمقوم القنطرة ثلاثي الطور كما يلي:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{\pi}{3}\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} = 1.00088 \qquad (11.61)$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} = 0.04197 \tag{11.62}$$

ويمكن من المعادلة (6) ايجاد كل من القدرة الخارجة المستمرة P_{dc} والمترددة P_{rms} التي تغذى لحمولة المقوم كما يلي:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_L} = \frac{9V_m^2}{\pi^2 R_L} = \frac{9\sqrt{2}V_s^2}{\pi^2 R_L} \tag{11.63}$$

$$P_{rms} = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{V_m^2}{R_L}\left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\right) = \frac{V_s^2}{R_L}\left(1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\right) \tag{11.64}$$

وفي مقوم القنطرة ثلاثي الطور سينقل الدايودين العاملين في كل فترة تيار ذراع القنطرة ليغذي كل ذراع قدرة الخرج المترددة P_{rms} لثلث الدورة حيث جهد ج.م.م المسلط على الدايودين جهد خط الثانوي V_S. وبملاحظة ان الدايودات تحمل التيار في اتجاه واحد بينما يحمله الخط في الاتجاهين ستكون القدرة P_{sac} المنقولة عبر خط ثانوي المحول ضعف القدرة المنقولة عبر الدايودات في اذرع القنطرة. وإذا كان تيار ذراع القنطرة I_a والقدرة المترددة المنقولة عبره P_a يمكن مما سبق التعبير عن تيار خط المحول I_S ومن ثم قدرة المحول P_{sac} كما يلي:

$$P_a = I_a^2 R_L \ , \quad P_{rms} = I_{rms}^2 R_L = 3P_a \quad \Rightarrow \quad I_a = I_{rms} / \sqrt{3} \tag{11.65}$$

$$P_{sac} = I_s^2 R_L = 2P_a \, , I_s^2 R_L = 2I_a^2 R_L \Rightarrow I_s = I_a\sqrt{2} = I_{rms}\sqrt{2} / \sqrt{3} \tag{11.66}$$

$$P_{sac} = \sqrt{3} V_s I_s = \frac{\sqrt{3}V_m}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2}I_{rms}}{\sqrt{3}} = \frac{V_m V_{rms}}{R_L} = \frac{V_m^2}{R_L}\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} = \frac{V_m^2}{R_L}\sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{4\pi}} \tag{11.67}$$

ومن ثم يمكن من المعادلتين (7) و (8) ايجاد قيم كفاءة التقويم η وعامل الانتفاع UF لمقوم القنطرة ثلاثي الطور كما يلي:

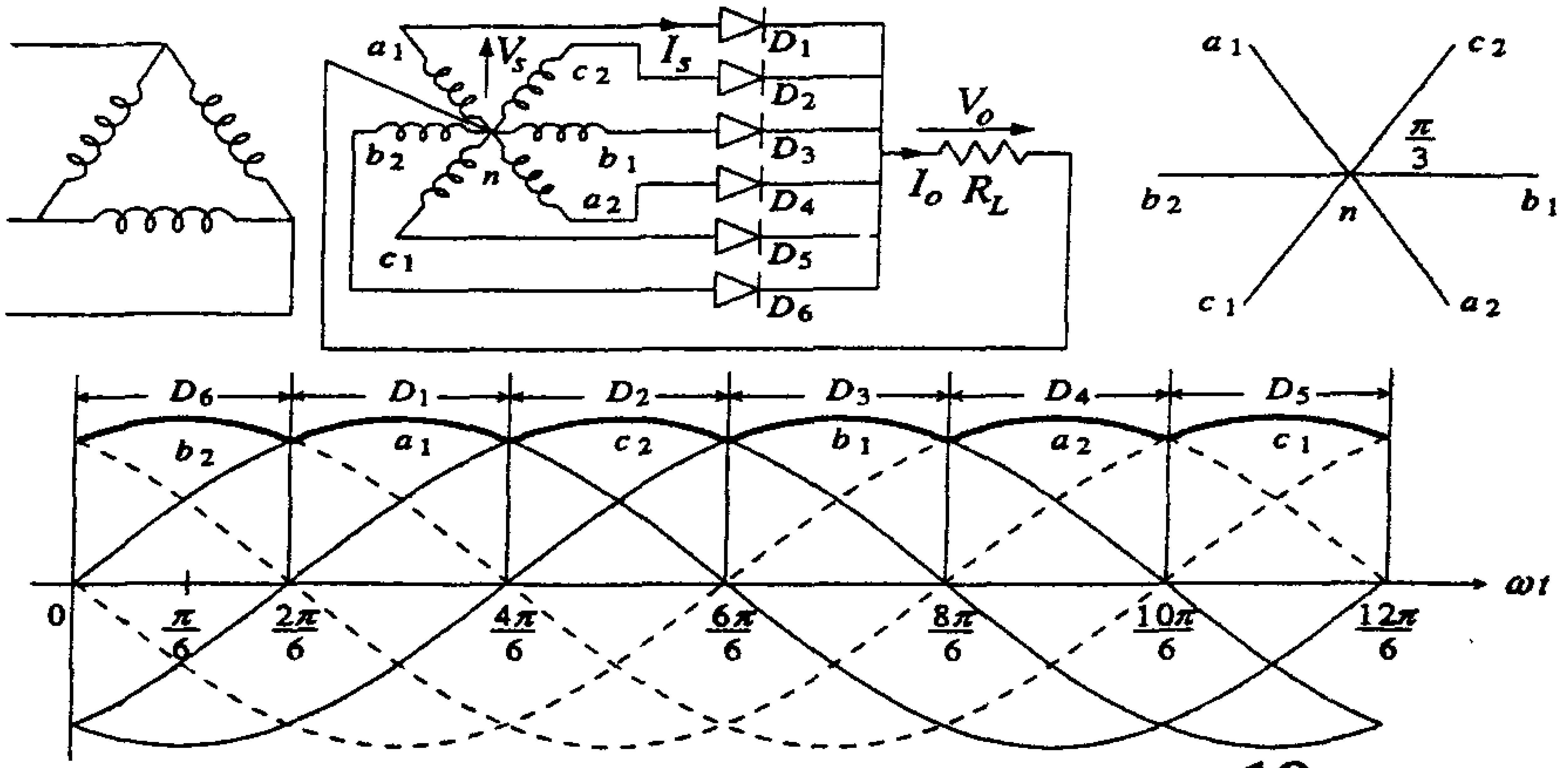
$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{9V_m^2}{\pi^2 R_L}\left(\frac{4\pi}{2\pi + 3\sqrt{3}}\right)\frac{R_L}{V_m^2} = \left(\frac{36/\pi}{2\pi + 3\sqrt{3}}\right) = 0.99824 \quad (11.68)$$

$$UF = \frac{P_{dc}}{P_{sac}} = \frac{9V_m^2}{\pi^2 R_L}\sqrt{\frac{4\pi}{2\pi + 3\sqrt{3}}}\frac{R_L}{V_m^2} = \sqrt{\frac{324/\pi^3}{2\pi + 3\sqrt{3}}} = 0.95409 \quad (11.69)$$

ويتضح من الشكل (17) ان الجهد العكسي الاعظم المطبق على كل دايود اثناء توقفه يساوي جهد خط الثانوي $PRV = V_m$.

6-4-11 مقوم نصف الموجة سداسي الطور مع حمل مقاومي:

يستخدم مقوم نصف الموجة سداسي الطور والذي يمكن تصنيفه كذلك كمقوم موجة كاملة ثلاثي الطور في تطبيقات التي تتطلب قدرة عالية حيث يمكن الحصول على جهد تيار مستمر اعلى وبتموجات أقل وكفاءة اعلى وانتفاع افضل بالمحول مقارنةً بمقوم نصف الموجب ثلاثي الطور. ويمكن الحصول على مقوم نصف الموجة سداسي الطور باستخدام محول ثلاثي الطور تتوفر في لفائفه الثانوية مآخذ نصفية في كل طور كما في الشكل (18).



شكل(18)مقوم نصف موجةسداسي الطور(موجة كاملة ثلاثي الطور)مع حمل مقاومي.

وكما في مقوم المآخذ النصفي احادي الطور سيتم في هذه الحالة تقويم كل من نصفي الموجة الموجب والسالب للشكل الموجي لكل طور لجهد الدخل ثلاثي الطور وكما في الشكل (18). ويلاحظ ان توصيل المآخذ النصفية للفائف ثلاثية الطور مع بعضها البعض سينتج نظام سداسي نجمي الطور حيث الازاحة بين كل طور والآخر 60^o. ولذلك يسمى مقوم الموجة الكاملة ثلاثية الطور احياناً بمقوم نصف الموجة سداسي الطور.

وفي بداية الشكل الموجي يتضح من الشكل (18) ان جهد $b2$ يكون موجباً بالنسبة لنقطة الحياد n وسيعمل الدايود $D1$ لأنه يتعرض لأكبر جهد امامي مقارنة بالأطوار الاخرى. وعند عمل احد الاطوار تتوقف الاطوار الاخرى لكون دايوداتها في انحياز عكسي حيث سيعمل طور واحد فقط في أي لحظة. وبعد $b2$ سيحول العمل الى $a1$ عندما يصبح جهده كبر من $b1$ وتتوالى اللفائف سداسية الطور (انصاف اللفائف ثلاثية الطور) في العمل واحدة تلو الاخرى. وكما يتضح سيستمر عمل كل دايود 60^o ويكون مثلاً من 0 الى 60^o للطور

$b2$ و $60°$ الى $120°$ للطور $a1$ حيث يتكرر ذلك مع كل الاطوار الستة.

وباهمال هبوط الجهد في الدايودات يمكن من المعادلتين (1) و(2) ايجاد قيم الجهد المستمر V_{dc} وجهد ج.م.م V_{rms} في جهد الخرج V_O لمقوم نصف الموجة الدايودي سداسي الطور والمبين في الشكل (18) كما يلي:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi/6}\int_{2\pi/6}^{4\pi/6} V_m \sin\omega t \, d(\omega t) = \frac{3}{\pi} V_m = 0.95493 \quad V_m = 1.35047 V_s \qquad (11.70)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/6}\int_{2\pi/6}^{4\pi/6} V_m^2 \sin^2\omega t \, d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}}\, V_m = 0.95577 \quad V_m = 1.35166\ V_s \qquad (11.71)$$

ويمكن من المعادلتين (3) و (5) ايجاد كل من عاملي الشكل FF والتموج RF لمقوم الموجة الكاملة ثلاثي الطور كما يلي:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} = \frac{\pi}{3}\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} = 1.00088 \qquad (11.72)$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1} = 0.04197 \qquad (11.73)$$

ويمكن من المعادلة (6) ايجاد كل من القدرة الخارجة المستمرة P_{dc} والمترددة P_{rms} التي تغذى لحمولة المقوم كما يلي:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R_L} = \frac{9V_m^2}{\pi^2 R_L} = \frac{9\sqrt{2}V_s^2}{\pi^2 R_L} \qquad (11.74)$$

$$P_{rms} = V_{rms} I_{rms} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{V_m^2}{R_L}\left(\frac{1}{2}+\frac{3\sqrt{3}}{4\pi}\right) = \frac{V_s^2}{R_L}\left(1+\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\right) \qquad (11.75)$$

وفي مقوم نصف الموجة سداسي الطور سينقل الدايود العامل تيار ج.م.م الثانوي I_S ليغذي قدرة الخرج المترددة P_{rms} لسدس الدورة حيث جهد ج.م.م المسلط على الدايود جهد طور الثانوي V_S. وعليه يمكن التعبير عن I_S وقدرة المحول P_{sac} كما يلي:

$$P_{rms} = I_{rms}^2 R_L = 6 I_s^2 R_L \;\; \Rightarrow \;\; I_s = I_{rms} / \sqrt{6} \qquad (11.76)$$

$$P_{sac} = 6 V_S I_S =$$

$$6 \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_{rms}}{\sqrt{6}} = \frac{\sqrt{6}\, V_m V_{rms}}{\sqrt{2}\, R_L} = \frac{\sqrt{6}\, V_m^2}{\sqrt{2} R_L} \sqrt{\frac{2\pi + 3\sqrt{3}}{4\pi}} = \frac{V_m^2}{R_L} \sqrt{\frac{6\pi + 9\sqrt{3}}{4\pi}}$$

$$(11.77)$$

ويمكن من المعادلتين (7) و (8) ايجاد قيم كفاءة التقويم η وعامل الانتفاع UF لمقوم نصف الموجة ثلاثي الطور كما يلي:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{rms}} = \frac{9 V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \left(\frac{4\pi}{2\pi + 3\sqrt{3}} \right) \frac{R_L}{V_m^2} = \frac{36/\pi}{2\pi + 3\sqrt{3}} = 0.99824$$

$$(11.78)$$

$$UF = \frac{P_{dc}}{P_{sac}} = \frac{9 V_m^2}{\pi^2 R_L} \times \sqrt{\frac{4\pi}{6\pi + 9\sqrt{3}}} \frac{R_L}{V_m^2} = \sqrt{\frac{324/\pi^3}{6\pi + 9\sqrt{3}}} = 0.55084$$

$$(11.79)$$

ويتبين من الشكل (18) ان الجهد العكسي الاعظم المطبق للدايود المتوقف يساوي يضعف جهد الطور الثانوي $PRV = 2V_m$.

11-4-7 مقومات نصف الموجة متعددة الاطوار مع حمل مقاومي:

يتضح من المقارنة بين مقوم نصف الموجة ثلاثي الطور ومقوم نصف الموجة سداسي الطور ان زيادة عدد الاطوار من ثلاثة الى ستة

خفض عامل التموج في الشكل الموجي لجهد التيار المستمر الخارج من حوالى 18.7% الى حوالى 4.2% ورفع كفاءة التحويل من 96.7% الى 99.8% ولاشك ان هذا التحسن سيكون اكبر اذا ما تم استخدام عدد اطوار اكثر حيث عادةً ما يبرز نظام الاثنى عشرة طوراً والأربعة وعشرون طوراً. ويمكن الحصول على هذه النظم متعددة الاطوار من النظام ثلاثي الطور باستخدام محولات يتم تقسيم لفائفها الثانوية الى عدد مناسب من الاجزاء التي يتم توصيلها في شكل مناسب.

وإذا كان عدد اطوار مقوم نصف الموجة q يتضح بوضع q بدل 6 في مقام قياس الزوايا في الشكل (18) ان كل دايود سيعمل بمفرده لفترة $2\pi/q$ من الدورة حيث يتوالى الدور من دايود الى آخر حسب ترتيب الاطوار. وبذلك سيتكون الشكل الموجى لجهد الخرج من نبضات جيبية بعدد الاطوار يستمر كل منها لفترة $2\pi/q$ حيث يمكن التعبير عن النبضة الاولى بدالة جيب تمام متأخرة بإزاحة زاوية قدرها π/q نسبة الى الطور الاول. وعليه يمكن بإهمال هبوط جهد الدايودات ايجاد قيم الجهد المستمر V_{dc} وجهد ج.م.م V_{rms} في جهد الخرج لمقوم نصف موجة ذو q طوراً من المعادلتين (1) و (2) كما يلي:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi/q}\int_0^{2\pi/q} V_m \cos(\omega t - \pi/q)\, d(\omega t) = \frac{q}{\pi} V_m \sin(\pi/q) = \frac{q}{\pi\sqrt{2}} V_s \sin(\pi/q)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi/q}\int_0^{2\pi/q} V_m^2 \cos^2(\omega t - \pi/q)\, d(\omega t)} = V_m\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{q}{4\pi}\sin(2\pi/q)} = V_s\sqrt{1 + \frac{q}{2\pi}\sin(2\pi/q)}$$

(11.81)

وفي مقوم نصف الموجة ذو q طوراً سينقل الدايود العامل تيار ج.م.م الثانوي I_S ليغذي قدرة الخرج المترددة P_{rms} لفترة $1/q$ من الدورة

حيث جهد ج.م.م المسلط عليه جهد طور الثانوي V_S. وعليه يمكن التعبير عن تيار ثانوي المحول I_S كما يلي:

$$P_{rms} = I_{rms}^2 R_L = qI_s^2 R_L \Rightarrow I_s = I_{rms} / \sqrt{q} = (V_{rms} / R_L) / \sqrt{q} \quad (11.82)$$

$$I_s = \frac{V_m}{R_L\sqrt{q}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{q}{4\pi} sin(2\pi/q)} = I_m \sqrt{\frac{1}{2p} + \frac{1}{4\pi} sin(2\pi/q)} \quad (11.83)$$

5-11 المقومات غير المحكومة مع احمال حثية RL:

في الكثير من الحالات تكون احمال المقومات بطبيعتها حثية يمكن تمثيلها بمعاوقة تتكون من مقاومة مع محاثة على التوالى. ويمكن النظر الى المحاثة المتوالية على انها تمثل مفاعل كعنصر فعال سيعمل بطبيعته على تقليل التموجات في الشكل الموجي للخرج والحد منها. وللقيام بهذا المهمة يلعب المفاعل دورين في آن واحد وهما:

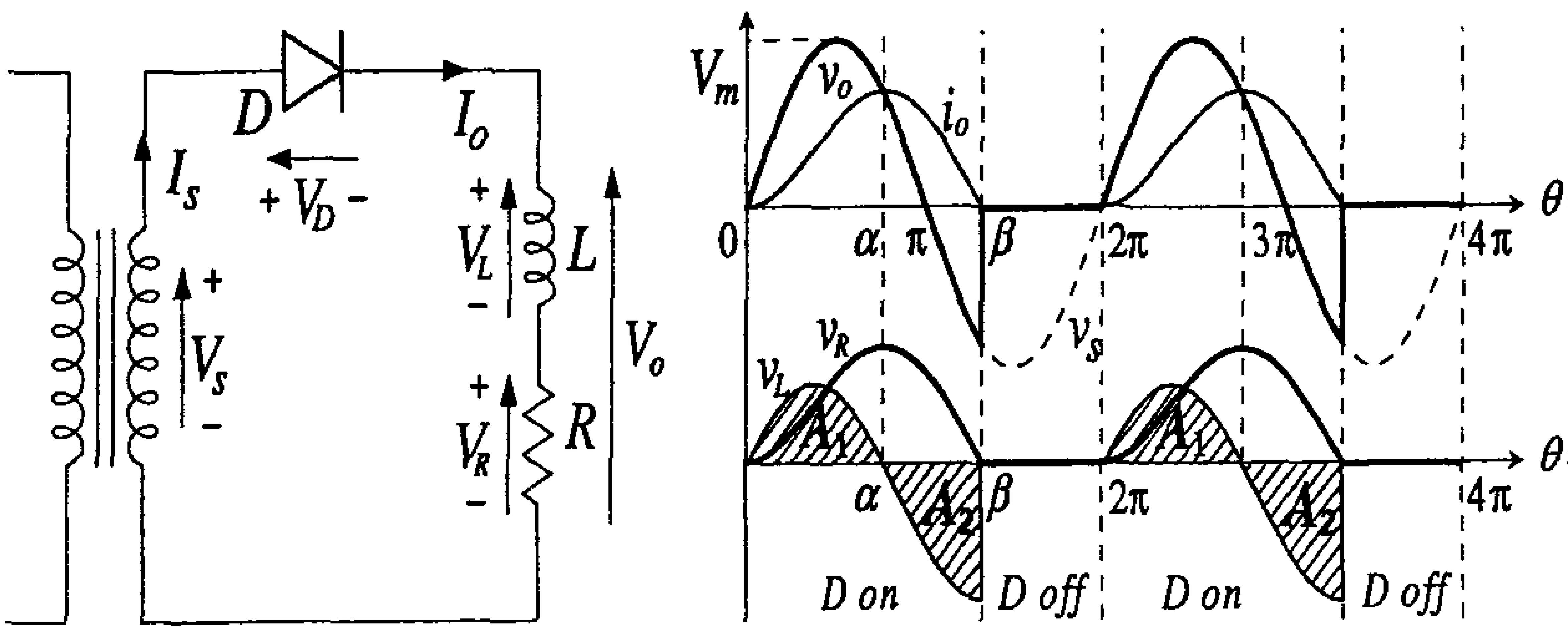
1 – يعمل المفاعل كمرشح لمركبات التيار غير المرغوب فيها لكونه سيبدئ معاوقة توالي عالية لمركبات التوافقيات العالية المترددة ويحد منها في تيار الخرج حيث تكون مفاعلة التوافقية n في تيار الخرج ($X_n = n\omega L$).

2 – سيوفر المفاعل وسيلة كهرومغناطيسية لتخزين الطاقة حيث يقوم بالتخزين عند بدء التيار في الارتفاع فوق القيمة المتوسطة ليفرغها الى مقاومة الحمولة عندما يبدأ هذا التيار في الانخفاض تحت قيمته الوسطى.

وسيكتفى هنا بدراسة اداء بعض المقومات فقط تحت تأثير الاحمال الحثية حيث يمكن بسهولة تعميم ذلك على اي مقوم آخر.

11-5-1 مقوم نصف الموجة احادي الطور مع حمل حثي RL:

في حالة الحمل المقاومي لمقوم نصف الموجة سيعمل الدايود عندما يكون جهد المصعد موجباً بالنسبة الى المهبط. وباهمال هبوط الجهد عبر الدايود واعتبار جهد الانحياز الامامي الذي يبدأ عنده الدايود في التوصيل صفراً، سيكون الجهد بين طرفي الحمولة المقاومية مساوياً للنصف الموجب لدورة جهد المصدر الجيبي. ولكن وجود المحاثة كعنصر فعال سيجعل الامر مختلفا. ويبين الشكل (19) الدائرة المكافئة لمقوم نصف الموجة احادي الطور يغذي حمل حثي RL والشكل الموجي لجهد المصدر V_S وجهد وتيار الخرج V_O و I_O حيث يشمل V_O هبوط الجهد عبر المقاومة V_R وعبر المحاثة V_L. وبإهمال هبوط الجهد في الدايود عند التوصيل وتيار التسرب عند التوقف، يمكن تقييم اداء المقوم بدراسة عمله في حالتي التشغيل المحتملتين وهما حالة عمل (توصيل) الدايود عندما يكون في انحياز امامي وحالة توقف (قطع) الدايود عندما يكون في انحياز عكسي وكما يلي:



شكل (19) مقوم نصف الموجة الدايودي احادي الطور مع حمل مقاومي.

(1) حالة عمل الدايود $(0<\omega t<\beta)$: يبدأ الدايود التوصيل مع صعود الجهد v_S ويحافظ المصدر على تدفق تيار الخرج $i_O > 0$ طالما بقي الدايود في انحياز امامي. ومع ارتفاع التيار يكون الجهد المحتث في المفاعلة v_L موجباً ومضاداً لجهد المصدر ليصل الصفر في اللحظة $\omega t=\alpha$ التي يصل عندها التيار ذروته ويكون عندها هبوط الجهد في مقاومة الحمل v_R مساوياً لجهد المصدر. ومع ارتفاع التيار نحو الذروة يتم شحن المفاعلة بالطاقة لتخزنها في مجالها المغناطيسي وكما تمثلها المساحة A_1 في الشكل (19). ولكون شحن المفاعلة بالطاقة لن يتم فجأة، سيصل التيار الى ذروته متأخراً عن الجهد حيث $\alpha > \pi/2$ عبرها وكما هو متوقع للمعاوقة الحثية.

ومع تناقص التيار من الذروة يصبح هبوط جهد المقاومة اكبر من جهد المصدر ويصبح الجهد المحتث في المفاعلة سالباً وداعماً لجهد المصدر وتبقى محصلة جهد المفاعلة والمقاومة اقل من جهد المصدر ليستمر الدايود في انحياز امامي. ومع تناقص التيار نحو الصفر تقوم المفاعلة بتفريغ الطاقة التي تمثلها المساحة A_2 في الشكل (19) الى الدائرة. ولكون طاقة المفاعلة لن تفرغ فجأةً سيستمر الدايود في التوصيل حتى بعد $\omega t=\pi$ وتحول جهد المصدر للسالب ليصل التيار للصفر متأخراً عن الجهد في اللحظة $\omega t=\beta$ التي تكون عندها $A_2=A_1$ وبعد ان يتم تفريغ كل الطاقة المخزنة في مجال المفاعلة. وفي الفترة $\pi < \omega t < \beta$ تعمل المفاعلة كمصدر لتحافظ على تدفق تيار في الفترة التي يكون فيها جهد المصدر سالباً.

(2) حالة توقف الدايود $(\beta < \omega t<2\pi)$: بعد تفريغ كل الطاقة المخزنة في المفاعلة ووصول التيار للصفر سيتوقف الدايود عن التوصيل

ويمنع تدفق التيار السالب وعندها يكون جهد المصدر اقل من محصلة جهد المفاعلة والمقاومة ويكون الدايود في انحياز عكسي. وستكون الدائرة في هذه الحالة مفتوحة وتيار وجهد الحمولة صفراً حيث يستمر الامر كذلك الى ان يبدأ جهد المصدر في تغيير اتجاهه نحو الموجب في الدورة التالية، وتتكرر حالة عمل الدايود كما سبق.

وبمعرفة قيود متغيرات حالتي العمل والتوقف يمكن تقييم اداء مقوم نصف الموجة ذو الحمل الحثي بالتعبير عن جهد وتيار الحمولة في الحالتين باعتبارهما يحدثان بشكل دوري. وفي حالة توقف الدايود يمكن التعبير عن الجهد والتيار ببساطة كما يلي:

$$i_O = v_O = 0\,, \qquad \beta \le \omega t \le 2\pi \qquad (11.84)$$

وفي فترة عمل الدايود يمكن من قانون كيرشوف للجهد التعبير عن اداء الدائرة باعتبار جهد المصدر يمثل دالة دورية قسرية ومعادلة الجهد تفاضلية لحظية باعتبار جهد المصدر v_S يساوي مجموع هبوط الجهد المحتث في المفاعلة $v_L = L\ di_O/dt$ وهبوط الجهد في المقاومة $v_R = R\, i_O$ وكما يلي:

$$v_L + v_R = v_S = V_m \sin \omega t\,, \quad 0 < \omega t < \beta \quad (11.85)$$

$$L\frac{di_o}{dt} + R i_o = V_m \sin \omega t\,, \qquad 0 < \omega t < \beta \qquad (11.86)$$

ومن اساسيات المعادلات التفاضلية سيشمل حل المعادلة (86) مركبة الحل المتمم الذي يصف الاستجابة الطبيعية عند الدخل الصفري $(v_S = 0)$ وهو يمثل الاستجابة العابرة الابتدائية للدائرة، ومركبة الحل الخاص الذي يصف الاستجابة القسرية للدائرة عند

الدخل الاعتيادي وهو يمثل الاستجابة الثابتة للدائرة المستقرة. ويمكن الحصول على الحل المتمم للمعادلة (86) كما يلي:

$$L\frac{di_o}{dt}+Ri_o=0 \longrightarrow i_{oc}(\theta)=A\times e^{-\theta/\omega\tau}, \quad \tau=\frac{L}{R}, \quad \theta=\omega t \qquad (11.87)$$

حيث يمثل τ الثابت الزمني للمعادلة ويمثل A ثابت التكامل الذي يمكن حسابه من الشروط الابتدائية كما سيتضح لاحقاً. وفي المقابل يعطى الحل الخاص للمعادلة (86) بالمعادلة الطورية لتيار الحالة الثابتة لدائرة RL المتوالية وكما يلي:

$$I_o=\frac{V_s}{Z}\angle-\varphi, \quad i_{op}(\theta)=\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi), \quad Z=\sqrt{R^2+(\omega L)^2}, \quad \varphi=\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \qquad (11.88)$$

ويمكن من المعادلتين (87) و (88) التعبير عن الحل التام للمعادلة (86) من مجموع الحلين المتمم والخاص كما يلي:

$$i_o(\theta)=i_{oc}(\theta)+i_{op}(\theta)=A\times e^{-\theta/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) \qquad (11.89)$$

ويمكن ايجاد ثابت التكامل A من الشروط الابتدائية لدائرة المقوم باعتبار التيار صفر لحظة بدء عمل الدايود وذلك بالتعويض عن $i_O = 0$ عندما $\omega t = 0$ في المعادلة (89) وكما يلي:

$$A=-\frac{V_m}{Z}\sin(-\varphi)=\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi) \qquad (11.90)$$

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\left[\sin(\varphi)e^{-\theta/\omega\tau}+\sin(\theta-\varphi)\right], \theta=\omega t \qquad (11.91)$$

ولكون $A1=A2$ في الشكل (19) وجهد وتيار فترة التوقف اصفار ومجموع جهد المفاعلة والمقاومة يساوي جهد المصدر يكون

متوسط جهد المفاعلة صفراً ومتوسط جهد الخرج يساوي متوسط جهد المقاومة ومن ثم متوسط جهد المصدر لفترة العمل. وبذلك يمكن التعبير عن متوسط و ج.م.م جهد وتيار الخرج لمقوم الحمل الحثي لفترة عمل الدايود $\beta > \omega t > 0$ كما يلي:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta} V_m \sin(\theta)\, d\theta = \frac{V_m}{2\pi}(1-\cos\beta) \qquad (11.92)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{V_m}{2\pi R}(1-\cos\beta) \qquad (11.93)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\beta} V_m^2 \sin^2(\theta)\, d\theta} = V_m\sqrt{\frac{2\beta-\sin 2\beta}{8\pi}} \qquad (11.94)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi Z^2}\int_0^{\beta}\left[\sin(\varphi)e^{-\theta/\omega\tau} + \sin(\theta-\varphi)\right]^2 d\theta} \qquad (11.95)$$

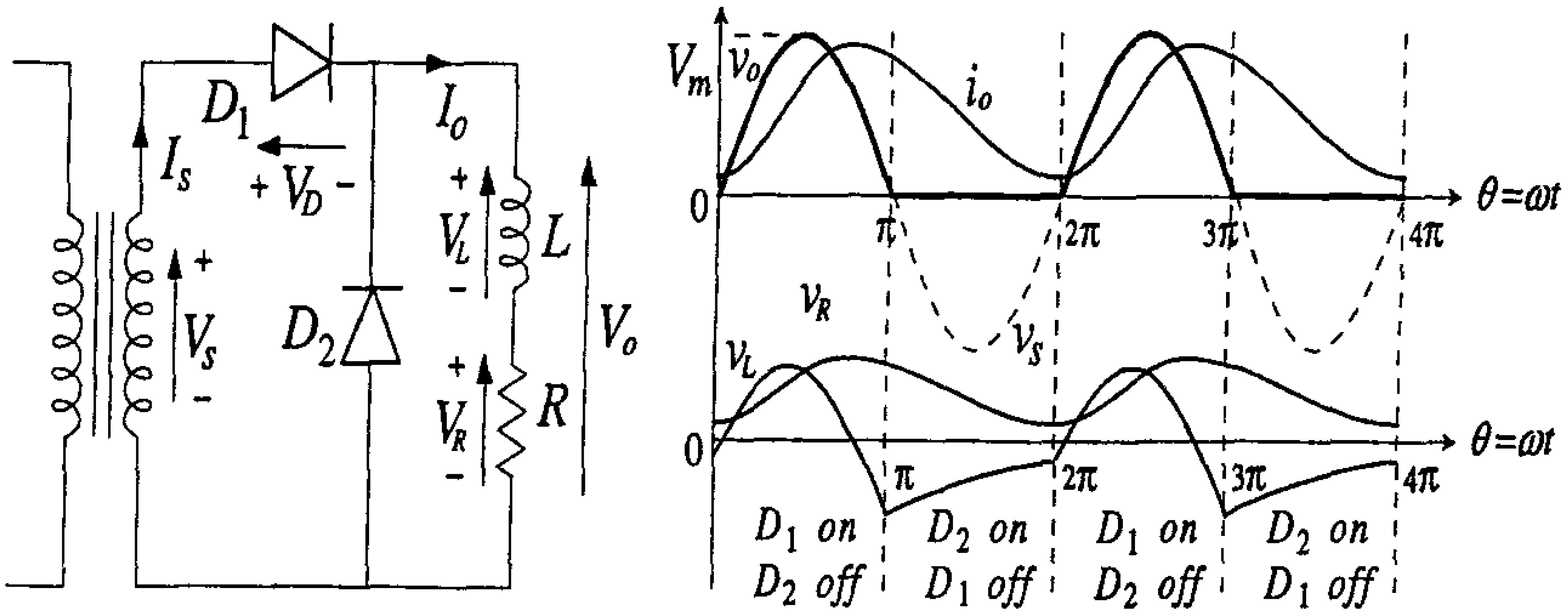
وبالتعويض عن شروط نهاية فترة التوصيل حيث $i_O(\beta) = 0$ في المعادلة (91) يمكن ايجاد زاوية القطع β من المعادلة التالية بطريقة التجربة والخطأ او أي طريقة عددية بسيطة مناسبة:

$$\sin(\beta-\varphi) + \sin(\varphi)e^{-\beta R/\omega L} = 0 \qquad (11.96)$$

11-5-2 مقوم نصف الموجة مع حمل حثي RL ودايود اطلاق:

تبين في حالة مقوم نصف الموجة احادي الطور ذو الحمل الحثي RL والمبين في الشكل (19) ان متوسط جهد الخرج المعطى بالمعادلة (92) يتناسب عكسياً مع زاوية القطع $\cos\beta$ حيث $\pi < \beta \le 2\pi$ وسيكون اكبر ما يمكن عندما $\cos\beta = 0$ او $\beta = 2\pi$. ويمكن جعل $\beta = 2\pi$ بإضافة دايود اطلاق (freewheeling) D_2 بين طرفي الحمولة الحثية وكما هو مبين في الشكل (20). وعندما ينخفض جهد المصدر الى الصفر باتجاه السالب سيصبح الدايود D_1 في انحياز

عكسي ويتوقف عن العمل. ولكن دايود الاطلاق سيكون في انحياز امامي ويسمح بتدفق التيار المدفوع بالطاقة المخزنة في المفاعلة والى ان يتم تفريغها. وبذلك ستعمل شحنة المفاعلة على جعل $D2$ يعمل في النصف الثاني للشكل الموجي لجهد المصدر بدلاً من الابقاء على $D1$ يعمل في انحياز امامي في بداية النصف الثاني. وسيؤدي ذلك الى خفض فترة توصيل $D1$ في النصف الثاني الى الصفر.



شكل (20) مقوم نصف الموجة الدايودي احادي الطور مع دايود اطلاق.

ويتضح ان استخدام مفاعلة محاثة كبيرة يجعلها تخزن طاقة اكبر يستغرق تفريغها للحمولة عبر دايود الاطلاق $D2$ وقت اطول. وبذلك يمكن القول انه اذا كان الثابت الزمني للدائرة (R/L) اكبر من نصف طول موجة جهد المصدر ستحافظ المفاعلة على عمل $D2$ طيلة النصف السالب للشكل الموجي لجهد المصدر كما هو مبين في الشكل (20). وبذلك سيحافظ دايود الاطلاق $D2$ على تيار الحمولة متصلاً وليس متقطعاً كما في الشكل (19)، وهو ما يقلل من تموج تيار الخرج ويزيد من متوسطه. وبذلك يمر عمل الدائرة بحالتين هما حالة عمل الدايود $D1$ وتوقف الدايود $D2$ في نصف الدورة الموجب لجهد المصدر $(0<\omega t<\pi)$ وحالة عمل الدايود $D2$ وتوقف الدايود $D1$ في نصف الدورة السالب $(\pi<\omega t<2\pi)$ وكما في الشكل (20).

وفي النصف الاول حيث يكون الدايود $D2$ متوقفاً يكون عمل المقوم مماثلاً للمقوم بدون دايود اطلاق والمبين في الشكل (19). وتبنى معادلة الجهد التفاضلية باعتبار جهد المصدر يساوي مجموع هبوط الجهد في المفاعلة والمقاومة كما في المعادلة (86). وبالمثل سيشمل حل هذه المعادلة وكما في المعادلة (89) مركبة الحل المتمم الذي يمثل الاستجابة الطبيعية العابرة عند الدخل الصفري، ومركبة الحل الخاص الذي يمثل الاستجابة القسرية الثابتة المستقرة عند الدخل الاعتيادي وكما يلي:

$$L\frac{di_o}{dt}+Ri_1=V_m\sin\omega t,\qquad 0<\omega t<\pi \qquad (11.97)$$

$$i_1(\theta)=A\times e^{-\theta/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi),\quad \theta=\omega t \qquad (11.98)$$

$$\tau=\frac{L}{R},\quad Z=\sqrt{R^2+(\omega L)^2},\quad \varphi=\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

وتختلف دائرة الشكل (19) التي لا تضم دايود اطلاق عن دائرة الشكل (20) التي تضم دايود اطلاق في كيفية ايجاد الثابت A. فبينما يكون التيار متقطعاً في الدائرة التي لا تضم دايود اطلاق حيث $i_1(0)=0$، يكون التيار متصلاً في الدائرة ذات دايود الاطلاق حيث $i_2(2\pi)=\ i_1(0)$ بسبب الطبيعة الدورية لدالة التيار. ولكون دايود الاطلاق يعمل في الفترة $(\pi<\omega t<2\pi)$ حيث جهد المصدر صفراً بسبب توقف الدايود الرئيسي وفتح الدائرة، تكون معادلة الجهد لهذه الفترة مماثلة للمعادلة المتجانسة وحلها مماثل للحل المتمم لمعادلة فترة النصف الاول بالدخل الصفري. ولكون فترة عمل دايود الاطلاق تبدأ عند $\theta=$ $\omega t=\pi$ يتم استخدام $(\theta-\pi)$ للفترة المنقضية بدلاً من θ ذاتها وكما يلي:

$$L\frac{di_o}{dt}+Ri_2=0, \qquad \pi<\omega t<2\pi \qquad (11.99)$$

$$i_2(\theta)=i_1(\pi)\times e^{-(\theta-\pi)/\omega\tau}, \qquad \tau=\frac{L}{R}, \quad \theta=\omega t \qquad (11.100)$$

وبـالتعويض عـن $i_1(\pi)$ مـن المعادلـة (98) في المعادلـة (100) يمكن اعادة كتابة المعادلة (100) والتعبير عن $i_2(2\pi)$ كما يلي:

$$i_1(\pi)=A\times e^{-\pi/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi) \qquad (11.101)$$

$$i_2(\theta)=\left(A\times e^{-\pi/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\right)e^{-(\theta-\pi)/\omega\tau} \qquad (11.102)$$

$$i_2(2\pi)=\left(A\times e^{-\pi/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\right)e^{-\pi/\omega\tau}=A\times e^{-2\pi/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)e^{-\pi/\omega\tau}$$
$$(11.103)$$

ولكـون $i_1(0) \;\; =i_2(2\pi)$ يمكـن بـالتعبير عـن $i_1(0)$ مـن المعادلة (98) ومساواة الناتج بالمعادلة (103) ايجاد الثابت A كما يلي:

$$i_1(0)=A-\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)=i_2(2\pi) \qquad (11.104)$$

$$A-\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)=A\times e^{-2\pi/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)e^{-\pi/\omega\tau} \qquad (11.105)$$

$$\left(1-e^{-2\pi/\omega\tau}\right)A=\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\left(1+e^{-\pi/\omega\tau}\right) \qquad (11.106)$$

$$A=\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\left(\frac{1+e^{-\pi/\omega\tau}}{1-e^{-2\pi/\omega\tau}}\right) \qquad (11.107)$$

وعليه يمكن من المعادلتين (98) و (107) والمعادلتين (102) و (107) التعبير عن تيار الخرج $i_O(\theta)$ لمقوم نصف الموجة احادي الطور ذو الحمل الحثي مع دايود الاطلاق كما يلي:

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\left(\frac{1+e^{-\pi/\omega\tau}}{1-e^{-2\pi/\omega\tau}}\sin(\varphi)e^{-\theta/\omega\tau}+\sin(\theta-\varphi)\right),0<\theta<\pi$$

(11.108)

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\left(\frac{1+e^{-\pi/\omega\tau}}{1-e^{-2\pi/\omega\tau}}e^{-\theta/\omega\tau}+e^{-(\theta-\pi)/\omega\tau}\right)\sin(\varphi),\ \pi<\theta<2\pi$$

(11.109)

$$\theta=\omega t,\quad \tau=\frac{L}{R},\quad Z=\sqrt{R^2+(\omega L)^2},\quad \varphi=\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

(11.110)

ويتبين من الشكل (20) ان جهد الخرج للنصف الاول من الدورة يساوي جهد المصدر ويكون عبارة عن مجموع جهود المفاعلة والمقاومة، بينما يكون جهد الخرج في النصف الثاني للدورة حيث الدايود $D2$ يقصر الحمولة صفراً. وبذلك يمكن التعبير عن جهود المقاومة والمفاعلة ومتوسط و ج.م.م جهد وتيار الخرج لمقوم الحمل الحثي مع دايود الاطلاق كما يلي:

$$v_R=i_O R,\qquad v_O=v_L+v_R \qquad (11.111)$$

$$v_O=V_m\sin\omega t,\ v_L=v_O-v_R,\qquad 0<\omega t<\pi$$

(11.112)

$$v_O=0,\qquad v_L=-v_R,\ \pi<\omega t<2\pi$$

(11.113)

$$V_{dc}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}V_m\sin(\theta)\,d\theta=\frac{V_m}{\pi}\ ,V_{rms}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}V_m^2\sin^2(\theta)\,d\theta}=\frac{V_m}{2}$$

(1.114)

$$I_{dc}=\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi}\left(Ae^{-\theta/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi)\right)d\theta+\int_{\pi}^{2\pi}\left(Ae^{-\theta/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\theta)e^{-(\theta-\pi)/\omega\tau}\right)d\theta\right]$$

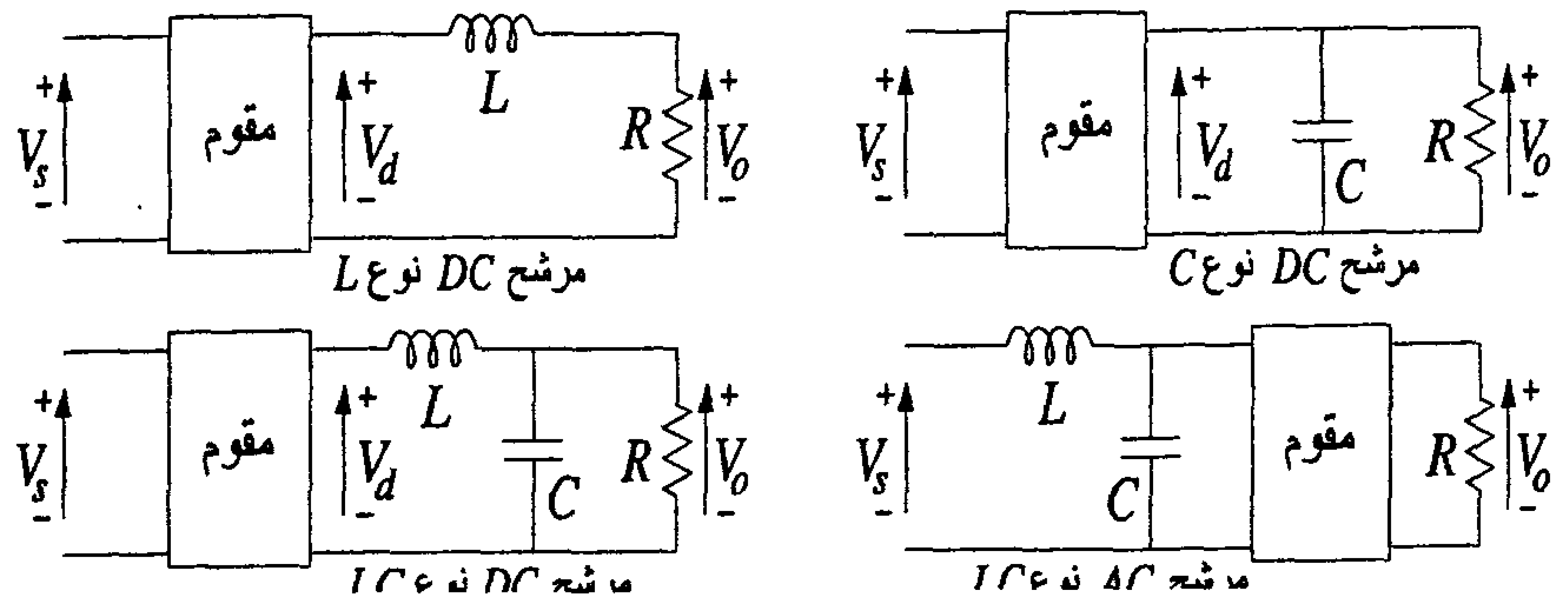
(11.115)

$$I_{rms}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{\pi}\left(Ae^{-\theta/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi)\right)^2d\theta+\int_{\pi}^{2\pi}\left(Ae^{-\theta/\omega\tau}+\frac{V_m}{Z}\sin(\theta)e^{-(\theta-\pi)/\omega\tau}\right)^2d\theta\right]}$$

(11.116)

11-6 مرشحات المقومات غير المحكومة:

تبين فيما سبق ان جهد خرج المقومات عالي التموج ويحتوي على مركبات توافقية، كما تبين ان تموجات التيار ستكون اقل في حالة الحمولة التي تضم مقاومة على التوالي مع مفاعلة. ومن المهم في الكثير من الحالات الحد من تموجات وتوافقيات خرج المقوم الى اكثر من يمكن للحصول على خرج تيار مستمر عالي الجودة. كما يتطلب الامر في بعض الحالات اتخاذ الاجراءات المناسبة للحد من التوافقيات في تيار المصدر والناتجة عن المقومات لمالها من آثار سلبية على اداء منظومة التغذية. ولتحقيق ذلك يمكن استخدام دوائر الترشيح او المرشحات لتنعيم جهد الخرج المستمر للمقوم، وهي تسمى في هذه الحالة بمرشحات التيار المستمر وعادةً ما يصنف نوعها حسب العناصر المستخدمة الى مرشحات L ومرشحات C و مرشحات LC. كما تستخدم مرشحات التيار المتردد للحد من التوافقيات الناتجة عن المقومات في مصادر التغذية وهي غالباً ما تكون من مرشحات LC. ويبين الشكل (21) الانواع المختلفة لمرشحات التيار المستمر والتيار المتردد.



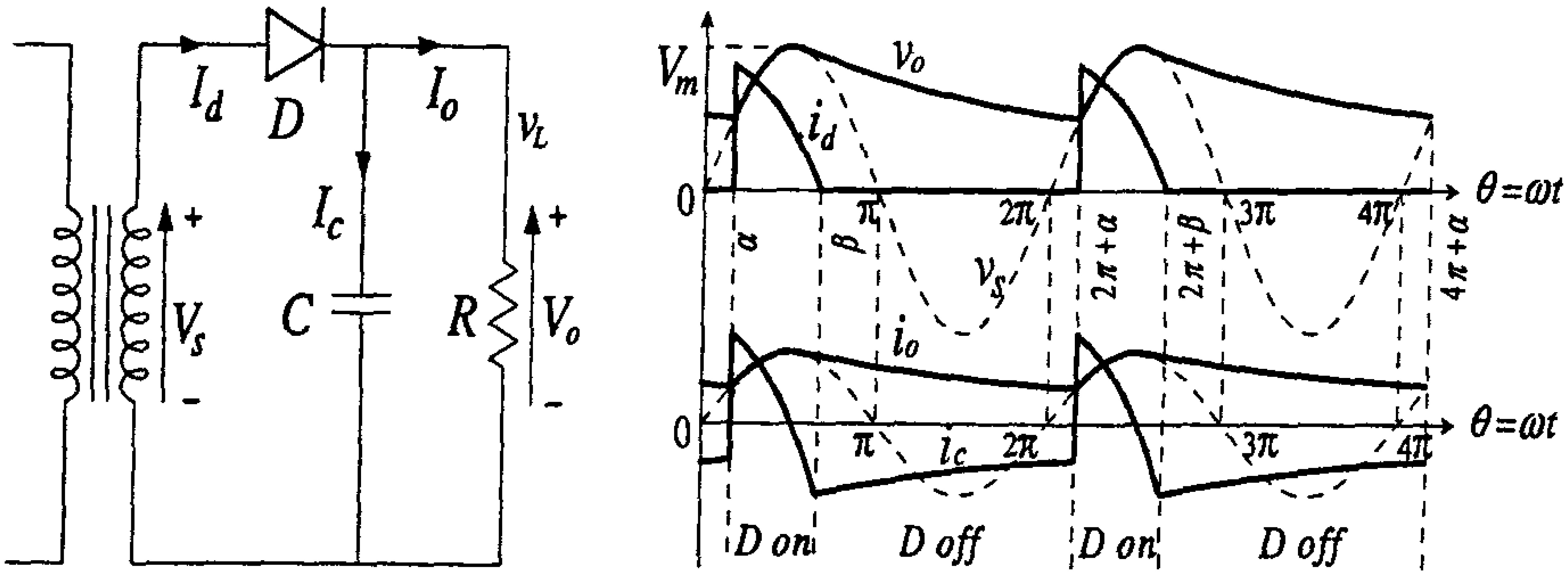
شكل (21) مرشحات التيار المستمر والمتردد للمقومات.

ويكون اداء المقوم مع مرشح تيار مستمر نوع L مماثلاً لأداء مقوم الحمل الحثي RL باعتبار المقاومة R تمثل حمولة المقوم والمفاعلة المتوالية L تعمل كمرشح يبدئ معاوقة كبيرة لمركبات التوافقيات المترددة في خرج المقوم. ويعيب مرشح L وكما يتضح من الشكل (19) انه بينما يتطلب خفض تموجات تيار الخرج زيادة زاوية القطع β باستخدام محاثة كبيرة فإن زيادة β تؤدي الى خفض متوسط جهد وقدرة الخرج المستمر وكما يتضح من المعادلة (92) حيث يتبين ان $V_{dc} \to 0$ عندما $\beta \to 2\pi$.

1-6-11 مقوم نصف الموجة احادي الطور مع مرشح C:

يستخدم مرشح التيار المستمر نوع C وكما في الشكل (21) مكثف ذو متسعة C على التوازي مع الحمولة R حيث يؤثر وجود المتسعة على طول فترتي عمل وتوقف الدايود والشكل الموجي لتيار وجهد الخرج بشكل كبير. وسيقوم المكثف بخزن الطاقة التي يستمدها من المصدر اثناء شحنه في فترة عمل الدايود ليزود بها الحمولة اثناء تفريغه في فترة توقف الدايود. ويؤدي ذلك الى اطالة فترة تدفق تيار الحمولة لتفوق كثيرا فترة عمل الدايود. ويمكن جعل تيار الخرج

متصلاً واقل تموجاً وتيار الدايود متقطعاً عند استخدام متسعة مناسبة.
ويبين الشكل (22) دائرة مقوم نصف موجة احادي الطور مع مرشح C والشكل الموجي للجهد والتيار بافتراض مثالية الدايود والمكثف وافترض ان المكثف خالى من الشحنة قبيل بدء تشغيل المقوم.



شكل (22) مقوم نصف موجة ذو مرشح تيار مستمر سعوى.

وبمجرد توصيل دائرة المقوم بالمصدر سيتم شحن المكثف طالما كان جهده اقل من المصدر وستصل جهد المكثف قيمته العظمى مع وصول جهد المصدر ذروته. وبهبوط جهد المصدر عن ذروته سيتوقف الدايود عن التوصيل لكونه سيصبح في انحياز عكسي حيث جهد المهبط (جهد المكثف) اكبر من جهد المصعد (جهد المصدر). ويعود ذلك لأن الطاقة المخزنة في المكثف تبقي على جهد الحمولة عالياً لفترة اطول من ربع الدورة التي يعود فيها جهد المصدر للصفر. ولذلك سيتدفق تيار الدايود لفترات قصيرة على شكل نبضات مقارنة بتدفقه طوال نصف الدورة الموجب عند عدم وجود المكثف وفي كل لحظة يكون مساوياً لمجموع تيار المكثف وتيار المقاومة وكما يتضح الشكل (22).

وعند ذروة الجهد حيث $\omega t=\pi/2$ سيهبط تيار المكثف $i_C=C$ dv_o/dt الى الصفر ويتحول من موجباً الى سالباً ليشترك المصدر والمكثف معاً في تغذية مقاومة الحمولة لفترة وجيزة. وفي لحظة β $>\pi/2$ سيصل تيار المكثف ذروة سالبة مساوية لتيار المقاومة الموجب وسيتوقف حينها الدايود عن التوصيل لكون محصلة تيار المكثف والدايود ستكون سالبة ولا يمكن للدايود ان ينقل تياراً سالباً. وبعد هذه اللحظة سيتولى المكثف تغذية حمولة المقاومة الى ان يتم تفريغ كل الطاقة المخزنة فيه حيث سيكون نمط التفريغ اسياً متلاشياً بتيار ابتدائي يساوي تيار الحمولة لحظة توقف الدايود وبمعدل تلاشي يحدد الثابت الزمني $\tau =RC$. وكما في الشكل (22) سوف يستمر المكثف في تفريغ شحنته الى مقاومة الحمولة الى لحظة ما في النصف الموجب في الدورة التالية يكون عندها جهد المصدر اعلى من جهد المكثف وعندها يعاد شحن المكثف وتعيد الدورة نفسها.

وفي الحالة الثابتة التي تبدأ من الدورة الثانية، سيبدأ عمل الدايود وإعادة شحن المكثف عند زاوية α ويتوقف ذلك عند زاوية β من بداية الدورة لتكون زاوية التوصيل التي يستمر فيها الدايود عاملاً θ $=\beta-\alpha$ اقل من نصف الدورة بكثير. وكما يتضح من الشكل (22) ان جهد الخرج لمقوم نصف الموجة اكثر ثبوتاً واقل تموجاً في حالة وجود المكثف منه في حالة عدم وجوده. ويعود ذلك الى الدور الترشيحي للمكثف. ولكون متوسط تيار الدايود يجب ان يكون مساوياً لمتوسط تيار الحمولة، فإن زمن عمل الدايود القصير يتطلب ان يكون تياره المتقطع ذو ذروة اكبر. ولضمان سلامته ستحدد طبيعة الذروة الحادة لتيار الدايود من تياره المتوسط المقنن. ويتمثل العيب الآخر للمقوم ذو

المرشح C الى ارتفاع جهد الانحياز العكسي للدايود والذي يساوي جهد المصدر اضافةً الى جهد الحمولة وقد يصل ضعفي ذروة جهد المصد .

وباهمال الحالة العابرة لبدء التشغيل او اعتبار المكثف مشحوناً عند البدء بنفس مستوى الشحن عند نهاية دورة الجهد ، يمكن في الحالة المثالية التعبير عن تيارات دائرة المقوم المبينة في الشكل (22) اثناء فترة عمل الدايود $\alpha<\omega\pi<\beta$ كما يلي:

$$v_O = v_S = V_m \sin(\omega t), \qquad i_o = \frac{v_o}{R}, \qquad i_c = C\frac{dv_o}{dt}$$

(11.117)

$$i_o = \frac{V_m}{R}\sin(\omega t), i_C = \omega C V_m \cos(\omega t), \alpha<\omega t<\beta$$

(11.118)

$$I_d = \frac{V_m}{R} + j\omega C V_m = \frac{V_m}{R}\sqrt{1+(\omega CR)^2}\angle\varphi, \varphi=\tan^{-1}(\omega CR)$$

(11.119)

$$i_d = i_o + i_c = \frac{V_m}{R}\sqrt{1+(\omega CR)^2}\sin(\omega t+\varphi), \qquad \alpha<\omega t<\beta$$

(11.120)

ويمكن ايجاد الزاوية β بملاحظة ان $i_d(\beta) = 0$ و ωCR موجباً بالضرورة وهو ما يستوجب ان يكون $\tan(\beta)$ سالباً وكما يلي:

$$i_d(\beta) = \frac{V_m}{R}\sin(\beta) + \omega C V_m \cos(\beta) = 0, \qquad \omega t = \beta,$$

$$\tan(\beta) = -\omega CR < 0, \beta = \tan^{-1}(-\omega CR), \qquad \tfrac{1}{2}\pi<\beta<\pi$$

(11.121)

وفي فترة تفريغ المكثف $\beta < \omega t < 2\pi + \alpha$ يكون الدايود متوقفاً والمصدر مفصولاً مبقياً على دائرة توالي RC مغلقة مجموع جهودها صفراً. وبذلك يمكن بتفاضل معادلة الجهد ومن ثم اعادة ترتيبها وتكامل طرفيها الحصول على تيار الحمولة كما يلي:

$$v_O + v_C = 0 \Rightarrow R i_o + \frac{1}{C}\int i_o\, dt = 0, \qquad \beta < \omega t < 2\pi + \alpha \qquad (11.122)$$

$$R\frac{di_o}{dt} + \frac{1}{C} i_o = 0, \qquad \frac{1}{i_o} di_o = -\frac{1}{RC} dt \Rightarrow \ln(i_o) = -\frac{t}{RC} + K \qquad (11.123)$$

$$i_o = e^{K - t/RC} = e^{K} e^{-t/RC} = A e^{-t/RC} \Rightarrow i_o = A e^{-\omega t/\omega CR} \qquad (11.124)$$

وكما يتضح من الشكل (22) يمكن ايجاد الثابت A بملاحظة ان تيار الحمولة عند $\omega t = \beta$ في نهاية فترة عمل الدايود كما يعطى بالمعادلة (118) يساوي تيار بداية فترة توقف الدايود كما يعطى بالمعادلة (124). وعليه يمكن التعبير عن التيارات كما يلي:

$$\frac{V_m}{R}\sin(\beta) = A e^{-\beta/\omega CR} \Rightarrow A = \frac{V_m}{R}\sin(\beta) e^{\beta/\omega CR} \qquad (11.125)$$

$$i_o = \frac{V_m}{R}\sin(\beta) e^{\beta/\omega CR} e^{-\omega t/\omega CR} = \frac{V_m}{R}\sin(\beta) e^{-(\omega t - \beta)/\omega CR}, \quad \beta < \omega t < 2\pi + \alpha \qquad (11.126)$$

$$i_c = -i_o = -\frac{V_m}{R}\sin(\beta) e^{-(\omega t - \beta)/\omega CR}, i_d = 0, \beta < \omega t < 2\pi + \alpha \qquad (11.127)$$

ويمكـن ايجـاد الزاويـة α بملاحظـة ان جهـد الحمولـة $i_O R$ مـن المعادلة (126) عنـد نهاية فترة توقـف الـدايود $\omega t = 2\pi + \alpha$ يسـاوى v_O ومن ثم جهد المصدر v_S من المعادلة (117) عند بداية فترة عمل الـدايود في الدورة التالية $\omega t = 2\pi + \alpha$ ، وذلك كما يلي:

$$V_m \sin(2\pi + \alpha) = V_m \sin(\beta)\, e^{-(2\pi+\alpha-\beta)/\omega CR}$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\beta)\, e^{-(2\pi+\alpha-\beta)/\omega CR}, \beta = \tan^{-1}(-\omega CR) \quad (11.128)$$

ويمكـن حسـاب الزاويـة α بحـل المعادلـة (128) بطريقـة الرسـم البيـاني او التجربـة والخطـأ او أي طريقـة عدديـة بسـيطة مناسـبة. وبـذلك يمكـن مـن المعـادلتين (118) و (126) ايجـاد متوسـط جهـد الحمولـة للدورة التي تشمل فترتي عمل وتقف الدايود كما يلي:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\left[\int_\alpha^\beta \frac{V_m}{R}\sin(\omega t)\, d(\omega t) + \int_\beta^{2\pi+\alpha} \frac{V_m}{R}\sin(\beta)\, e^{-(\omega t-\beta)/\omega CR} d(\omega t)\right]$$

$$(11.129)$$

$$I_{dc} = \frac{V_m}{2\pi R}\left[(\cos\alpha - \cos\beta) - \omega CR \sin\beta\, e^{\beta/(\omega CR)}\left(e^{-(2\pi+\alpha)/(\omega CR)} - e^{-\beta/(\omega CR)}\right)\right]$$

$$I_{dc} = \frac{V_m}{2\pi R}\left[(\cos\alpha - \cos\beta) + \omega CR\left(\sin\beta - \sin\beta\, e^{-(2\pi+\alpha-\beta)/(\omega CR)}\right)\right]$$

$$(11.130)$$

ويتضـح مـن المعـادلتين (119) و (121) ان $\tan(\beta) = -\omega CR$

ومن ثم $\tan(\pi - \beta) = \omega CR = \tan(\varphi)$، ومن ذلك يتبين ان:

$$\beta = \pi - \varphi, \quad \cos(\beta) = -\sin(\varphi) = -1/(\omega C Z),$$

$$(11.131)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + 1/(\omega C)^2} \quad (11.132)$$

وبحساب قيم كل من β و α يمكن بالتعويض عن ωCR من المعادلة (121) وعن $\sin\alpha$ من المعادلة (128) التعبير عن متوسط تيار الخرج I_{dc} وجهد الخرج $V_{dc}=R\,I_{dc}$ من المعادلة (131) كما يلي:

$$I_{dc}=\frac{V_m}{2\pi R}[(\cos\alpha-\cos\beta)-\tan\beta(\sin\beta-\sin\alpha)]$$

$$=\frac{V_m}{2\pi R}\left[(\cos\alpha-\cos\beta)-\frac{\sin\beta}{\cos\beta}(\sin\beta-\sin\alpha)\right]$$

$$=V_m\left[\frac{\cos\beta\cos\alpha-\cos^2\beta-\sin^2\beta+\sin\beta\sin\alpha}{2\pi R\cos\beta}\right]$$

$$I_{dc}=V_m\left[\frac{1-\cos(\beta-\alpha)}{2\pi R\cos\beta}\right]=\frac{V_m\,\omega C Z}{2\pi R}[1-\cos(\beta-\alpha)] \quad (11.133)$$

$$=\frac{V_m\,\omega C\sqrt{R^2+1/(\omega C)^2}}{2\pi R}[1-\cos(\beta-\alpha)]$$

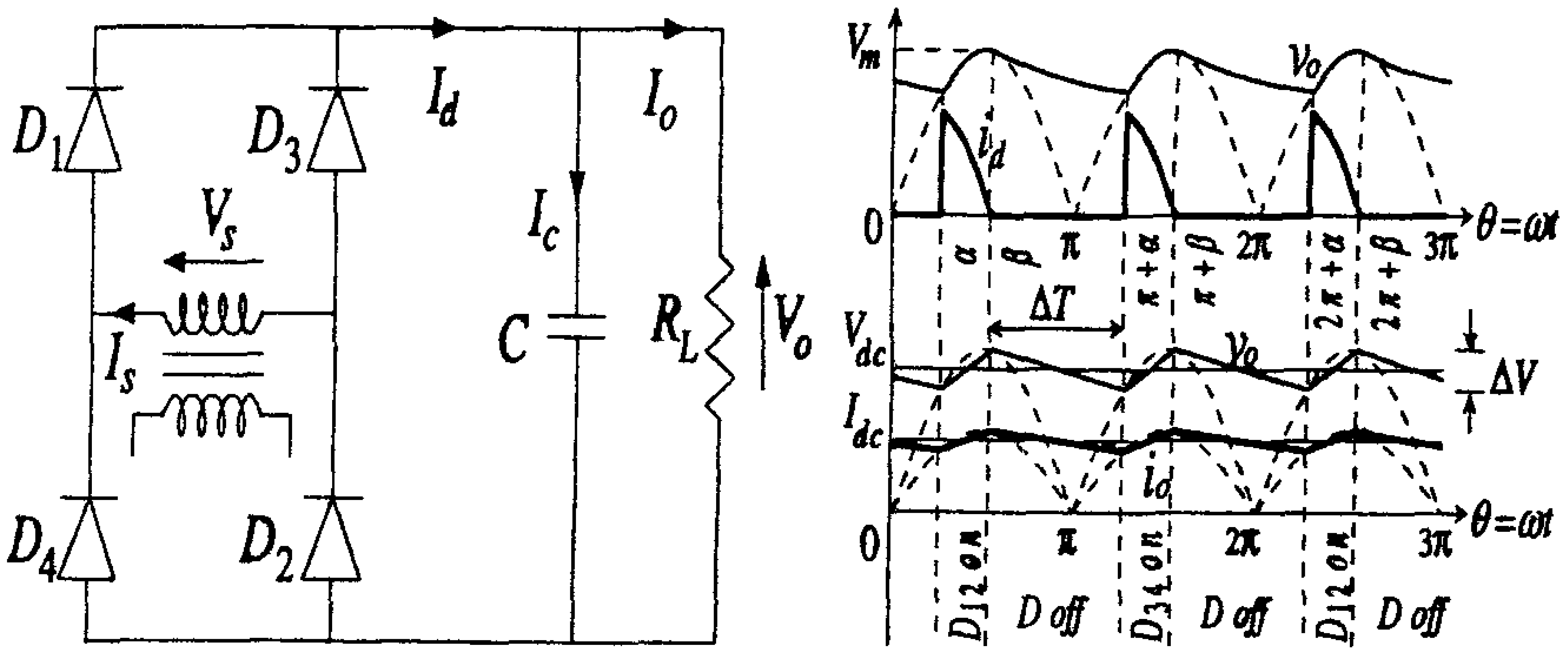
$$I_{dc}=\frac{V_m\sqrt{1+(\omega CR)^2}}{2\pi R}[1-\cos(\beta-\alpha)] \quad (11.134)$$

$$V_{dc}=\frac{V_m\sqrt{1+(\omega CR)^2}}{2\pi}[1-\cos(\beta-\alpha)] \quad (11.135)$$

ويتبين من المعادلة (134) ان متوسط تيار الخرج في مقاومة الحمولة سيزداد وتموجه سيقل بزيادة ωCR وهو ما يتطلب بالضرورة ان يكون تيار المصدر عبر الدايود ذو ذروة بارزة وقد يبلغ قيم عالية جداً عندما تكون فترة التوصيل $(\beta\text{-}\alpha)$ قصيرة. وفي بعض حالات التشغيل الاعتيادية يمكن ان يعرض تيار الذروة المرتفع الدايود للاضرار حتى عندما يكون متوسط تيار الدايود وفقوداته ضمن الحدود المسموح بها. ويمكن في الحياة العملية الحد من ذلك باضافة محاثة على التوالي بين الدايود والمكثف للحصول على مرشح LC كبديل افضل لمرشح C.

2-6-11 مقوم الموجة الكاملة احادي الطور مع مرشح C:

يمكن اشتقاق معادلات تيار وجهد مقوم الموجة الكاملة أحادي الطور مع مرشح C والمبين في الشكل (23) بطريقة مماثلة تماماً لما تم مع معادلات مقوم نصف الموجة مع ملاحظة استبدال طول الدورة 2π بالطول π اينما ورد في المعادلة (122) وحتى المعادلة (135). وعليه يمكن من المعادلة (129) الحصول على متوسط تيار الحمولة لمقوم الموجة الكاملة وكما يلي:



شكل (23) مقوم موجة كاملة ذو مرشح تيار مستمر سعوي.

$$-V_m \sin(\pi+\alpha) = V_m \sin(\beta)\, e^{-(\pi+\alpha-\beta)/\omega CR},$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\beta)\, e^{-(\pi+\alpha-\beta)/\omega CR} \qquad (11.136)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{\pi}\left[\int_{\alpha}^{\beta} \frac{V_m}{R}\sin(\omega t)\, d(\omega t) + \int_{\beta}^{\pi+\alpha} \frac{V_m}{R}\sin(\beta)\, e^{-(\omega t-\beta)/\omega CR}\, d(\omega t)\right]$$

$$= \frac{V_m}{\pi R}\left[(\cos\alpha - \cos\beta) + \omega C R\left(\sin\beta - \sin\beta\, e^{-(\pi+\alpha-\beta)/(\omega CR)}\right)\right]$$

(11.137)

$$I_{dc} = \frac{V_m}{\pi R}\left[(\cos\alpha - \cos\beta) - \tan\beta(\sin\beta - \sin\alpha)\right]$$

$$=V_m\left[\frac{\cos\beta\cos\alpha-\cos^2\beta-\sin^2\beta+\sin\beta\sin\alpha}{\pi R\cos\beta}\right]$$

$$=V_m\left[\frac{\cos(\beta-\alpha)-1}{\pi R\cos\beta}\right]=\frac{V_m\,\omega C Z}{\pi R}\left[1-\cos(\beta-\alpha)\right]=\frac{V_m\omega C\sqrt{R^2+1/(\omega C)^2}}{\pi R}\left[1-\cos(\beta-\alpha)\right]$$

(11.138)

$$I_{dc}=\frac{V_m\sqrt{1+(\omega CR)^2}}{\pi R}\left[1-\cos(\beta-\alpha)\right],$$

$$V_{dc}=\frac{V_m\sqrt{1+(\omega CR)^2}}{\pi}\left[1-\cos(\beta-\alpha)\right]$$

(11.139)

ويمكن التعبير عن متوسط الخرج ومعامل التموج لخرج مقوم الموجة الكاملة بطريقة تقريبية ذات دقة كافية للاغراض العملية. وتقوم هذه الطريقة على تمثيل منحنى جهد الخرج بقطع مستقيمة ولتكون ذروة جهد الخرج مساوية لذروة جهد المصدر. وكما في الشكل (23) سيمثل ΔV مدى تموج الجهد وسيكون متوسط الجهد عند المنتصف بين القيم العظمى والصغرى لجهد الخرج. وبينما تنطبق جميع المعادلات التي تم اشتقاقها لتقييم اداء مقوم نصف الموجة اثناء فترة عمل الدايود $\alpha<\omega\pi<\beta$ على مقوم الموجة الكاملة، فإن الامر سيختلف في فترة تفريغ المكثف عند توقف الدايود $\beta<\omega\pi<\pi+\alpha$ في مقوم الموجة الكاملة. ونظراً لتقريب منحنى الجهد بخطوط مستقيمة سيكون تفريغ المكثف ذو نمط خطي حيث يمكن ايجاد ΔV و V_{dc} كما يلي:

$$I_{dc}=C\frac{dv_o}{dt}\approx C\frac{\Delta V}{\Delta T}=\frac{C\,\Delta V}{(\pi+\alpha-\beta)/\omega}=\frac{\omega C\,\Delta V}{(\pi+\alpha-\beta)}$$

(11.140)

$$\Delta V = \frac{(\pi+\alpha-\beta) I_{dc}}{\omega C} = \frac{(\pi+\alpha-\beta) V_{dc}}{\omega CR}, \qquad V_{dc} = V_m - \frac{\Delta V}{2}$$

(11.141)

$$V_{dc} = V_m - \frac{(\pi+\alpha-\beta) V_{dc}}{2\omega CR} \Rightarrow V_{dc} = \frac{2\omega CRV_m}{2\omega CR + (\pi+\alpha-\beta)}$$

(11.142)

ويمكـن ايجـاد المركبـة المـترددة V_{ac} ومعامـل التمـوج تقريبيـاً RF باعتبـار خـط V_{dc} محـور زمـن الموجـة المثلثيـة والـذروة $\frac{1}{2}\Delta V$ وملاحظـة ان القيمـة العظمـى للموجـة المثلثيـة تسـاوي $\sqrt{3}$ في قيمـة ج.م.م وليس $\sqrt{2}$ كما في الموجة الجيبية، وكما يلي:

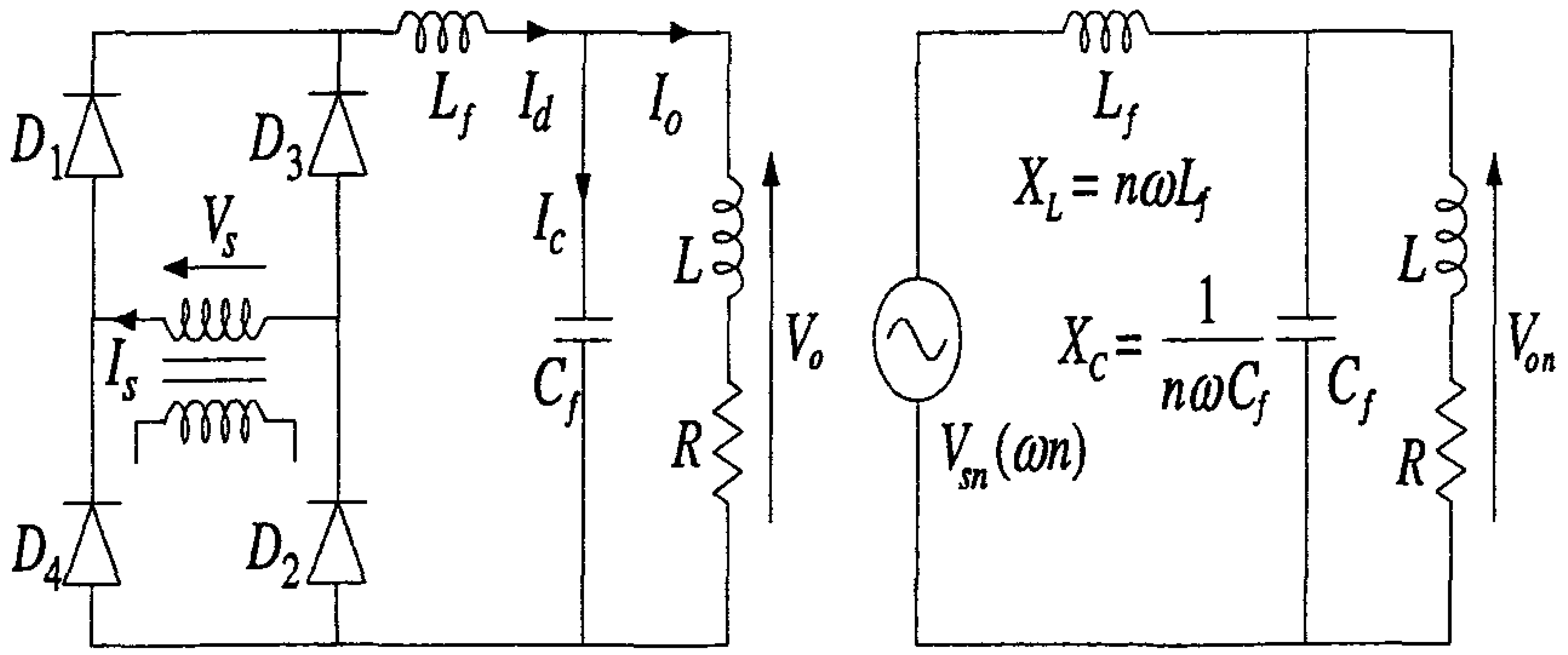
$$V_{ac} = \frac{\Delta V/2}{\sqrt{3}} = \frac{(\pi+\alpha-\beta) V_{dc}}{2\sqrt{3}\,\omega CR} = \frac{(\pi+\alpha-\beta) V_m/\sqrt{3}}{2\omega CR + (\pi+\alpha-\beta)},$$

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{(\pi+\alpha-\beta)}{2\sqrt{3}\,\omega CR} \qquad (11.143)$$

11-6-3 مقوم الموجة الكاملة احادي الطور مع مرشح LC:

لقد تبين فيما سبق ان مرشح L يعمل على خفض تموجات تيار الخرج وعامل تموج التيار بما يتناسب طردياً مع مقاومة الحمل. وهي عادةً ما تستخدم عند تغذية الاحمال الحثية مثل المرحلات ودوائر مجال الآلات الكهربائية حيث يؤدي خفض تموجات التيار الى خفض تموجات العزم والجهد وضجيج الآلات. وفي المقابل تعمل مرشحات C على خفض تموجات جهد الخرج وعامل تموج الجهد بما يتناسب عكسياً مع مقاومة الحمل. وهي عادةً ما تستخدم لتغذية الاحمال المقاومية. وللحصول على نتائج ترشيح افضل يمكن استخدام مرشح LC المبين في الشكل (24). وسيتم عند الحمل الخفيف حيث $R \to \infty$ شحن المكثف الى

قرابة جهد الذروة ليقل متوسط جهد الخرج عن ذلك مع زيادة الحمولة. وسيكون اداء مرشح LC مشابه لمرشح C لكون تأثير الملف والطاقة المخزنة فيه تكون مهملة عند التيار الخفيف. وفي المقابل يتم عند الحمل الثقيل حيث $R \rightarrow 0$ تخزين طاقة كبيرة في الملف يستغرق تفريغها وقت اطول من الزمن الدوري للدائرة ويكون فيها تيار الخرج متواصلاً غير متقطع. ويكون اداء مرشح LC مشابه لمرشح L لكون تأثير المكثف والطاقة المخزنة فيه تكون مهملة عند التيار الثقيل.



شكل (24) مقوم موجة كاملة ذو حمل RL ومرشح تيار مستمر LC.

ولكون التموج يقل عند الحمل الثقيل في مرشح L وعند الحمل الخفيف في مرشح C، فإن التموج سيكون اقل لكل الاحمال في مرشح LC. فمثلاً يعيب مرشح C انه بينما تنخفض تموجات الجهد لحمولة محددة مع زيادة المتسعة، فإن ذروة و ج.م.م تيار المقوم تزيد مع زيادة المتسعة. وقد تصل ذروة التيار قيم خطرة يمكن ان تتسبب في اتلاف الدايود، كما ان زيادة ج.م.م تيار المقوم مع زيادة المتسعة سيزيد من الحرارة الناتجة في لفائف المحول المغذي للمقوم. وعند اضافة محاثة L لمرشح C للحصول على مرشح LC ستعمل المحاثة على خفض ذروة و ج.م.م تيار المقوم بالإضافة الى خفض تموجات الجهد. وبذلك سيكون

التأثير على ذروة و ج.م.م التيار مع زيادة المحاثة معاكساً لما يحدث عند زيادة المتسعة.

وتعمل المحاثة في مرشح LC على خفض مركبات توافقيات التيار لتقوم المتسعة بترشيحها ، وسيقلل ذلك من التموجات مقارنةً بما يتحقق عند استخدام L او C فقط. وعليه سيعمل مرشح LC على خفض تموجات كل من تيار وجهد الخرج حيث تكون محصلة انخفاض عامل تموج مستقلة عن مقاومة الحمل. ويعد التحليل الدقيق لأداء مرشح LC في غاية التعقيد حيث يصعب تطبيق طريقة تحليل اداء مرشح C لصعوبة الوصول الى معادلات بسيطة لحساب زوايا عمل وتوقف الدايود. ويمكن الاستدلال بالعلاقات التي تم اشتقاقها لمرشح C لتقييم اداء مرشح LC عند الحمل الخفيف، كما يمكن الاستدلال بالعلاقات التي تم اشتقاقها لمرشح L لتقييم اداء مرشح LC عند الحمل الثقيل. وبالعودة الى اسس التحليل التوافقي المعطاة في المعادلتين (9) و (10) يمكن تمثيل جهد الخرج لمقوم الموجة الكاملة بمتسلسلة فورير كما يلي:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t)\, d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \qquad (11.144)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t)\cos(n\omega t)\, d(\omega t), \quad b_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t)\sin(n\omega t)\, d(\omega t)$$

$b_n = 0$, $n=1,2,3,\ldots,\infty$, $\qquad a_n = 0$, $n=1,3,5,\ldots,$

$$a_n = \frac{-4V_m}{\pi(n-1)(n+1)},\ n=2,4,6,\ldots\infty \qquad (11.145)$$

$$v_0(\omega t) = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) = \frac{4V_m}{\pi}\left(\frac{1}{2} - \sum_{n=2,4,6}^{\infty}\frac{\cos(n\omega t)}{(n-1)(n+1)}\right)$$
(11.146)

ويمكن الحصول على ج.م.م الجهد التوافقي الكلي من المعادلة (146) حيث عادةً ما يكتفي باعتبار التوافقية الثانية المهيمنة فقط. ويتضح من المعادلة (146) ان التوافقية المهيمنة هي التوافقية الثانية التي يفوق مقدارها خمسة اضعاف التوافقية الرابعة التالية لها واكثر من عشرة اضعاف التوافقيات الاخرى. وبذلك يمكن التعبير عن ج.م.م الجهد التوافقي الكلي كما يلي:

$$V_{ac} = \sqrt{\sum_{n=2,4,6}^{\infty} V_{sn}^2} = \sqrt{\sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left(\frac{4V_m / \sqrt{2}}{\pi(n-1)(2+1)} \right)^2} \approx V_{s2} = \frac{4V_m}{3\pi\sqrt{2}}$$

(11.147)

ويبين الشكل (24) الدائرة المكافئة للتوافقية n لمرشح LC بمصدر جهد توافقي V_n لتقييم الدائرة لترشيح مركبة التوافقية n في تيار الخرج. وللتخلص من تيار التوافقية n بجعلها تمر عبر المكثف C بدل الحمولة، يجب ان تكون معاوقة الحمل اكبر كثيراً من معاوقة المكثف لتيار التوافقية المعنية. وعادة ما يتم اختيار المتسعة ليكون تيارها عشر تيار الحمولة للتوافقية n حيث:

$$\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2} \gg \frac{1}{n\omega C_f} \qquad \Rightarrow \qquad \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2} = \frac{10}{n\omega C_f}$$

(11.148)

ويمكن من دائرة التوافقية n في الشكل (24) ايجاد ج.م.م مركبة التوافقية n في تيار الخرج من قانون مجزئ الجهد كما يلي:

$$V_{an} = \frac{1/(n\omega C_f)}{(n\omega L_f) - 1/(n\omega C_f)} V_{sn} = \frac{1}{(n\omega)^2 L_f C_f - 1} V_{sn}$$

(11.149)

وعليه يمكن ايجاد قيمة المتسعة المطلوبة في مرشح LC وفقاً لمعاملات الحمولة من المعادلة (148). ويمكن الحصول على محاثة المرشح بدلالة مركبة جهد الخرج المتردد استناداً للتوافقية المهيمنة (n=2) من المعادلتين (147) و (149) كما يلي:

$$V_{ac} = V_{a2} = \frac{1}{4\omega^2 L_f C_f - 1} V_{s2} = \left(\frac{1}{4\omega^2 L_f C_f - 1}\right)\frac{4V_m}{3\pi\sqrt{2}}$$

(11.150)

وعادة ما يستند تصميم مرشح LC الى مقدار التموج المسموح به بتحديد معامل التموج RF ومن ثم حساب المتسعة والمحاثة اللازمة لتحقيق ذلك حيث يمكن بمعرفة متسعة المرشح ايجاد قيمة المحاثة بالتعويض في معادلة معامل التموج كما يلي:

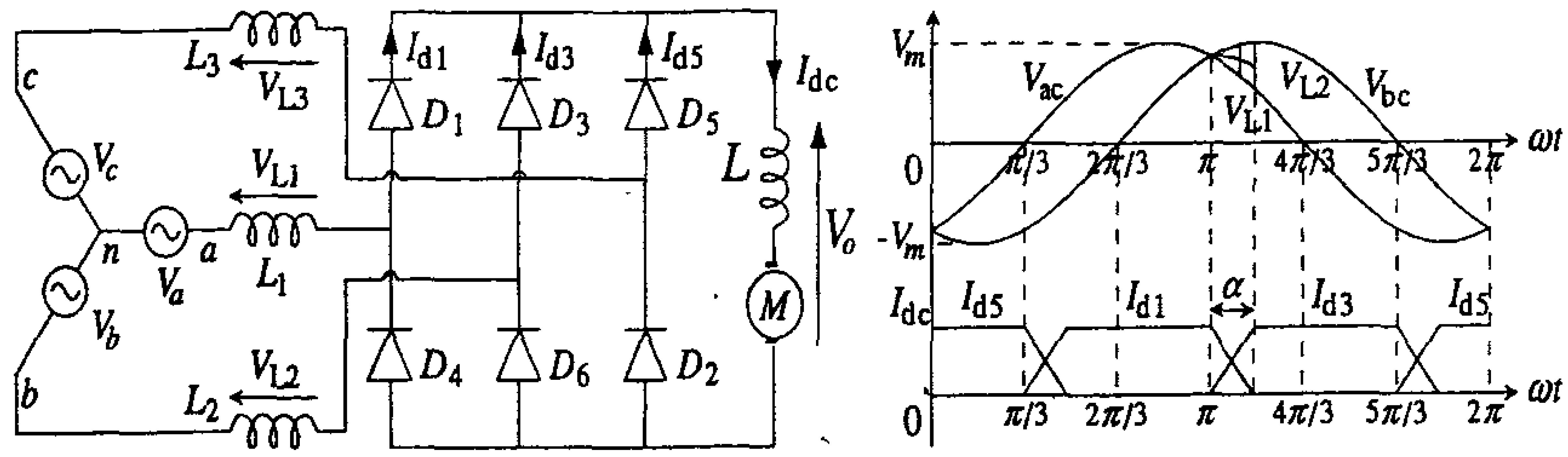
$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{V_{a2}}{V_{dc}} = \frac{1}{4\omega^2 L_f C_f - 1}\frac{V_{s2}}{V_{dc}} = \left(\frac{1}{4\omega^2 L_f C_f - 1}\right)\frac{\sqrt{2}}{3}$$

(11.151)

11-6-4 تأثير محاثة المصدر في اداء المقوم:

تلعب معاوقة محول او مصدر التغذية دوراً مهماً في اداء المقوم لا يقبل تجاهله في كل الحالات خصوصاً دور محاثة المصدر. وبملاحظة انه في كل لحظة سيعمل دايود جهد الانحياز الامامي الاعلى، يمكن توضيح تأثير المحاثة كما في الشكل (25). فعند $\omega t=\pi$ يكون $V_{ac}=V_{bc}$ ويستمر تيار الحمولة عبر الدايود D_1 حيث تحول المحاثة L_1 دون هبوط التيار فوراً للصفر وتمنع الوقف الفوري للتيار I_{d1} عبر D_1. وسيؤدي تناقص I_{d1} الى احتثات جهد v_{L1} عبر L_1 يجعل جهد الخرج $v_o= v_{ac}+ v_{L1}$. وفي ذات الوقت ستؤدي ارتفاع I_{d3} عبر D_3

الى احتثات جهد v_{L2} عبر L_2 ليصبح جهد الخرج $v_O= v_{bc} - v_{L2}$.



شكل (25) مقوم نصف الموجة الدايودي احادي الطور مع حمل ذو مصدر ق.د.ك..

ولذلك ستكون جهود D_1 و D_3 متساوية ليعمل الدايودين معاً لفترة α تسمى بزاوية التبديل (commutation) او التداخل (overlap) وتسمي مفاعلة المحاثة بمفاعلة التبديل، حيث سيعمل هذا التداخل على خفض جهد خرج المقوم. وبافتراض خطية ارتفاع وانخفاض التيار خلال فترة التبديل يمكن التعبير عن الجهد v_{L2} عبر L_2 كما يلي:

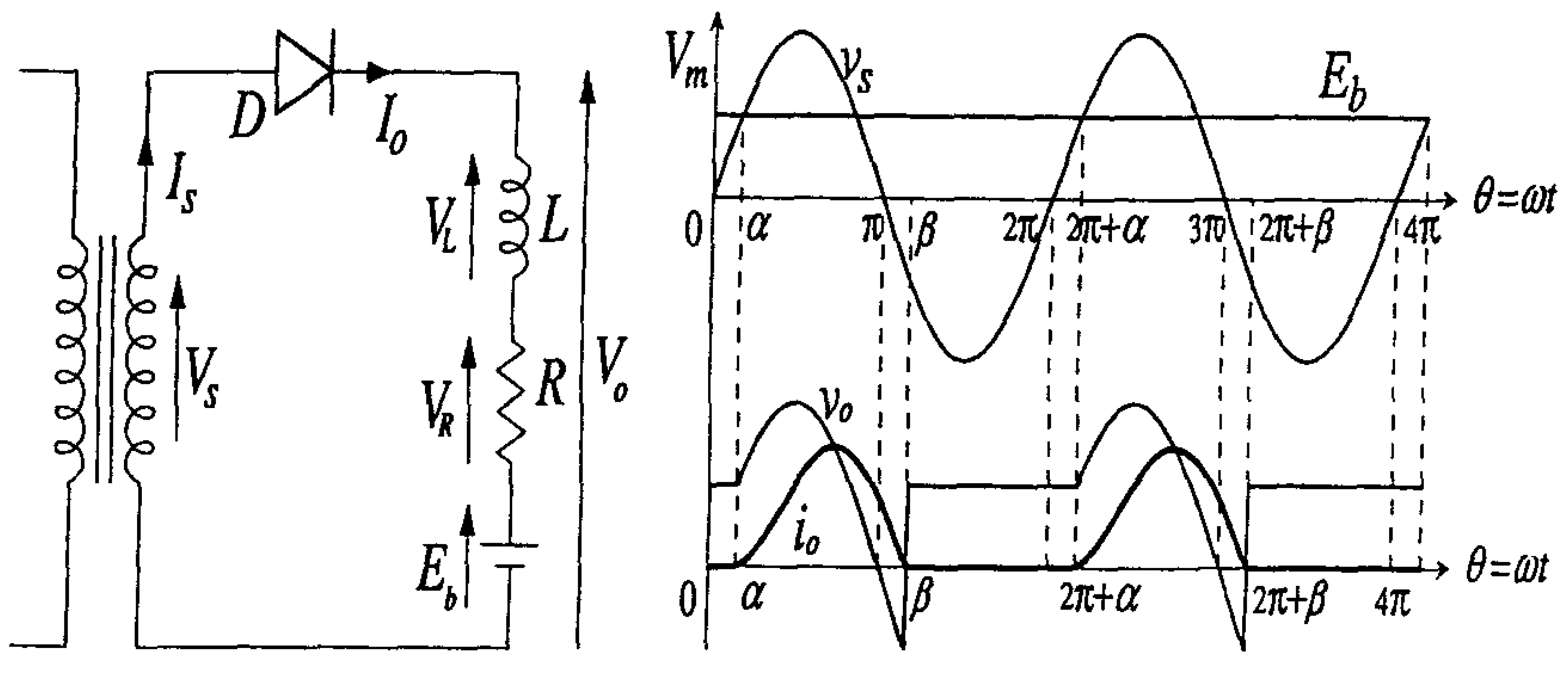
$$v_{L2}=L_2\, di/dt \approx L_2\, \Delta i/\Delta t\,, \qquad v_{L2}\, \Delta t = L_2\, \Delta i \qquad (11.152)$$

ونظر لتكرار التداخل لست مرات في الدورة الكاملة لمقوم القنطرة ثلاثي الطور يمكن التعبير عن متوسط انخفاض جهد الخرج الناتج عن مفاعلة التبديل وتبسيطه عند افتراض تساوى المحاثات $L_1=L_2=L_3=L_s$ كما يلي:

$$V_x =(1/T)\, 2(v_{L1}+ v_{L2}+ v_{L3})\Delta t = 2f(L_1+ L_2+ L_3)\Delta I$$
$$= 2f(L_1+ L_2+ L_3)I_{dc} = 6f\, L_s I_{dc} \qquad (11.153)$$

7-11 مقوم نصف الموجة احادي الطور مع حمل حثي RL ومصدر ق.د.ك:

لقد تم فيما سبق دراسة مقومات نصف الموجة والموجة الكاملة بحمل مقاومي او حثي RLC او سعوي RC او حمل RLC. وفي الحياة العملية كثيراً ما تستخدم المقومات لتغذية تضم مصدر ق.د.ك كما هو الحال في شاحنات البطاريات ونظم التحريك. ويجب في هذه الحالات اخذ ق.د.ك الحمولة في الاعتبار عند اشتقاق معادلات اداء المقوم وبما يعكس دورها في تدفق التيار. ويبين الشكل (26) الدائرة المكافئة لمقوم نصف الموجة احادي الطور يغذي حمل حثي RL مع مصدر تيار مستمر ذو ق.د.ك E_b والشكل الموجي لجهد المصدر v_S وجهد وتيار الخرج v_O و i_O. وبافتراض مثالية الدايود، سيكون الجهد بين طرفي RL مساوياً للفرق بين جهد المصدر الجيبي وق.د.ك الحمولة E_b مع اخذ نمو وتلاشي جهد الملف في الاعتبار. وباعتبار تيار الحمولة صفراً اثناء توقف الدايود يكفي لتقييم اداء المقوم دراسة عمله اثناء عمل الدايود عندما يكون في انحياز امامي.



شكل (26) مقوم نصف الموجة الدايودي احادي الطور مع حمل ذو مصدر ق.د.ك..

يبدأ الدايود التوصيل عند $v_s=E_b$ في اللحظة $\omega t=\alpha$ ويستمر تدفق التيار في فترة الانحياز الامامي. ومع ارتفاع التيار تخزن المفاعلة الطاقة ويكون جهدها موجباً مضاداً لجهد المصدر بما يتناسب مع معدل تغير التيار ليصل الصفر عند ذروة التيار في اللحظة $\omega t=\rho$ متأخراً عن لحظة ذروة الجهد. ومع تناقص التيار من الذروة يصبح جهد المفاعلة سالباً وداعماً لجهد المصدر وتبدأ تفريغ الطاقة التي اختزنتها حتى يصل التيار الصفر عند اللحظة $\omega t=\beta$ متأخراً عند اللحظة $\omega t=\sigma$ التي يصبح عندها جهد المصدر اقل من ق.د.ك الحمولة، وبعد ان يتم تفريغ كل الطاقة المخزنة في مجال المفاعلة. وفي الفترة $\sigma<\omega t<\beta$ تعمل المفاعلة كمصدر لتحافظ على تدفق تيار في الفترة التي يكون فيها فرق الجهد بين v_s و E_b سالباً.

وعليه يمكن تقييم اداء مقوم نصف الموجة ذو الحمل الحثي مع ق.د.ك حمولة E_b في فترة توقف الدايود $\beta \leq \omega t \leq 2\pi+\alpha$ وفي فترة عمله $\alpha<\omega t<\beta$ بالتعبير عن جهد وتيار الحمولة في الفترتين باعتبارهما يحدثان بشكل دوري وكما يلي:

$$i_o = v_o = 0, \qquad \beta \leq \omega t \leq 2\pi + \alpha \quad (11.154)$$

$$L\frac{di_o}{dt} + Ri_o = V_m \sin \omega t - E_b, \quad \alpha < \omega t < \beta \qquad (11.155)$$

وفي فترة عمل الدايود سيشمل حل المعادلة (155) مركبة الحل المتمم عند الدخل الصفري $i_{oc}(\omega t)$ وتشمل مركبتين أسيتين يمثلان الاستجابة العابرة الابتدائية المستمرة والمترددة للدائرة، ومركبة الحل الخاص عند الدخل الاعتيادي $i_{op}(\omega t)$ وتشمل مركبتين يمثلان يمثل الاستجابة القسرية الثابتة المستمرة $-E_b/R$ والمترددة i_s/Z للدائرة

المستقرة وكما يلي:

$$i_{oc}(\theta) = A_1 e^{-\theta/\omega\tau} + A_2 e^{-\theta/\omega\tau} = A e^{-\theta/\omega\tau}, \quad \tau = \frac{L}{R}, \quad \theta = \omega t$$

(11.156)

$$i_{op}(\theta) = \frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{E_b}{R}, \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

(11.157)

$$i_o(\theta) = i_{oc}(\theta) + i_{op}(\theta) = \frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{E_b}{R} + A\times e^{-\theta/\omega\tau}$$

(11.158)

ويمكن ايجاد A من المعادلة (158) من شروط لحظة بدء عمل الدايود $\omega t = \alpha$ حيث $i_o(\alpha)=0$ عند $V_m \sin(\alpha) = E_b$ لتصبح:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{E_b}{V_m}\right), \qquad A = \left[\frac{E_b}{R} - \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{\alpha/\omega\tau}$$

(11.159)

$$i_o(\theta) = \frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{E_b}{R} + \left[\frac{E_b}{R} - \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{(\alpha-\theta)/\omega\tau}$$

$$, \quad \alpha < \theta = \omega t < \beta \qquad (11.160)$$

ويمكن بالتعويض عن شروط نهاية فترة التوصيل حيث $i_o(\beta)$ $=0$ في المعادلة (160) ايجاد زاوية القطع β من المعادلة (161) الناتجة التالية بطريقة التجربة والخطأ او أي طريقة عددية بسيطة مناسبة انطلاقاً من قيمة ابتدائية $\beta = \pi$:

$$\sin(\beta-\varphi) + b e^{-d\beta} - c = 0, \quad c = \frac{E_b Z}{V_m R}, \quad b = [c - \sin(\alpha-\varphi)]e^{d\alpha}, \quad d = \frac{1}{\omega\tau} = \frac{R}{\omega L}$$

(11.161)

ويمكن بتفحص منحنى جهد الخرج v_O في الشكل (26)

ايجاد متوسط جهد الخرج V_{dc} للدورة الكاملة التي تشمل فترة عمل الدايود $\beta < \omega t < \alpha$ وفترة توقفه $\alpha + 2\pi \leq \omega t \leq \beta$ ومن ثم متوسط التيار I_{dc} كما يلي:

$$V_{dc}=\frac{1}{2\pi}\left[\int_{\alpha}^{\beta}V_m\sin(\theta)\,d\theta+\int_{\beta}^{2\pi+\alpha}E_b\,d\theta\right]=\frac{V_m}{2\pi}(\cos\alpha-\cos\beta)+\frac{E_b}{2\pi}(\alpha-\beta)+E_b \quad (11.162)$$

$$I_{dc}=\frac{V_R}{R}=\frac{V_{dc}-E_b}{R}=\frac{1}{2\pi R}\left[V_m(\cos\alpha-\cos\beta)-E_b(\beta-\alpha)\right] \quad (11.163)$$

كما يمكن بالعودة الى منحنى جهد الخرج v_O في الشكل (26) ايجاد ج.م.م جهد الخرج V_{rms} للدورة الكاملة كما يلي:

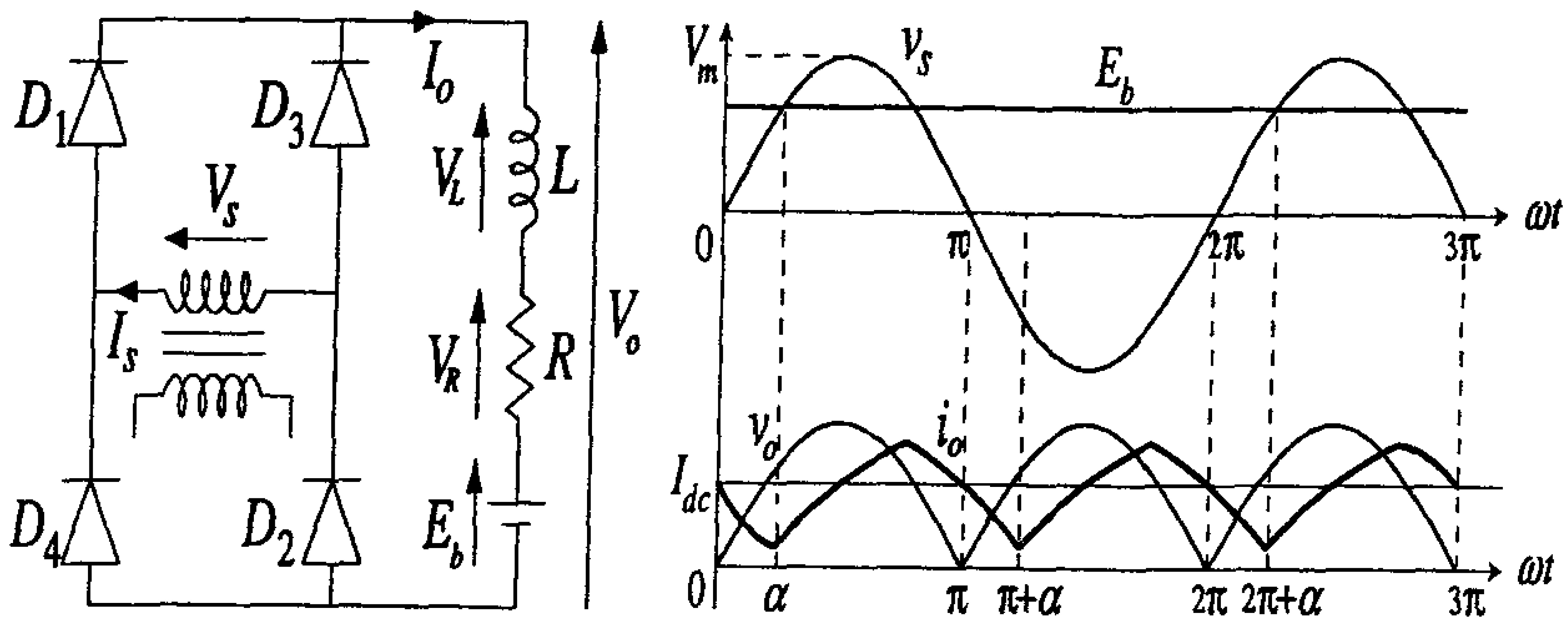
$$V_{rms}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\left(\int_{\alpha}^{\beta}V_m^2\sin^2(\theta)\,d\theta+\int_{\beta}^{2\pi+\alpha}E_b^2\,d\theta\right)}$$

$$=\sqrt{\frac{V_m^2}{8\pi}(\sin2\alpha-\sin2\beta+2\beta-2\alpha)+\frac{E_b^2}{2\pi}(\alpha-\beta)+E_b^2} \quad (11.164)$$

ويمكن تبسيط معادلات الجهد والتيار السابقة، المعادلات (154) الى (164)، لحالتي الحمل المحتملتين وهما الحالة التي يستخدم فيها المقوم كنظام للشحن حيث تكون الحمولة عبارة عن بطارية وعندها يمكن اهمال المحاثة في كل المعادلات السابقة لتكون $\beta+\varphi=\pi$ والحالة الثانية التي يستخدم فيها المقوم كمصدر لتغذية محرك تيار مستمر حيث يمكن اهمال المقاومة الصغيرة جداً.

11-8 مقوم الموجة الكاملة احادي الطور مع حمل حثي RL ومصدر ق.د.ك:

عادةً ما تستخدم مقومات الموجة الكاملة في الحالات التي تتطلب جهد تيار مستمر بجودة اعلى ومعامل تموج اقل، وخصوصاً في التطبيقات العالية القدرة مثل شاحنات البطاريات ونظم التحريك ذات محركات التيار المستمر التي تضم مصدر ق.د.ك. ويبين الشكل (27) الدائرة المكافئة لمقوم موجة كاملة احادي الطور يغذي حمل حثي RL مع مصدر تيار مستمر ذو ق.د.ك Eb والشكل الموجي لجهد المصدر V_S وجهد وتيار الخرج V_O و I_O. وبافتراض مثالية الدايود، سيكون الجهد بين طرفي RL مساوياً للفرق بين جهد المصدر الجيبي وق.د.ك الحمولة مع اخذ نمو وتلاشي جهد الملف في الاعتبار.



شكل (27) مقوم موجة كاملة احادي الطور مع حمل ذو مصدر ق.د.ك.

وفي النصف الموجب للشكل الموجي لجهد الخرج سيتدفق تيار الحمولة خلال الدايودين $D1$ و $D2$ لكونهما في انحياز امامي، وفي المقابل سيتدفق تيار الحمولة خلال الدايودين $D3$ و $D4$ لكونهما في انحياز امامي النصف السالب للشكل الموجي للجهد. ويمكن تقييم

اداء مقوم نصف الموجة ذو الحمل الحثي مع ق.د.ك حمولة E_b في بالتعبير عن معادلة الجهد اللحظية لحلقة الحمولة والحصول على معادلة تيار الخرج بحل هذه معادلة الجهد التفاضلية وكما يلي:

$$L\frac{di_o}{dt}+R\,i_o=V_m\sin\omega t-E_b \qquad (11.165)$$

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi)-\frac{E_b}{R}+A\times e^{-\theta/\omega\tau},\quad Z=\sqrt{R^2+(\omega L)^2},\quad \varphi=\tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \qquad (11.166)$$

وتعتمد قيمة ثابت التكامل A ومن تم التعبير النهائي لتيار الخرج على كونه متصلاً ام متقطعاً كما يحدده الثابت الزمني للدائرة.

(أ) حالة التيار المتصل حيث $i_o(\omega t)\geq 0$ لطول الفترة $0<\omega t<\pi$:

يمكن في هذه الحالة التعبير عن A و i_o من المعادلة (166) من شروط لحظة نهاية الدورة $\omega t=\pi$ حيث $i_o(\pi)=I_o$ وكما يلي:

$$A=\left[I_o+\frac{E_b}{R}-\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\right]e^{\pi/\omega\tau} \qquad (11.167)$$

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi)-\frac{E_b}{R}+\left[I_o+\frac{E_b}{R}-\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\right]e^{(\pi-\theta)/\omega\tau} \qquad (11.168)$$

ويمكن ايجاد I_o من المعادلة (168) ومن ثم التعبير عن i_o من شروط لحظة بدء الدورة $\omega t=0$ حيث $i_o(0)=I_o$ وكما يلي:

$$I_o=\frac{V_m}{Z}\sin(\varphi)\left(\frac{e^{\pi/\omega\tau}+1}{e^{\pi/\omega\tau}-1}\right)-\frac{E_b}{R} \qquad (11.169)$$

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\left[\sin(\theta-\varphi)+2\sin(\varphi)\left(\frac{e^{-\theta/\omega\tau}}{1-e^{-\pi/\omega\tau}}\right)\right]-\frac{E_b}{R},\quad \theta=\omega t \qquad (11.170)$$

ويمكن ايجاد متوسط وج.م.م تيار الخرج المتصل لمقوم الموجة الكاملة ذو الحمل الحثي مع حمولة بمصدر ق.د.ك كما يلي:

$$I_{dc}=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}i_o(\theta)d\theta=\frac{V_m}{\pi Z}\left[\cos(-\varphi)-\cos(\pi-\varphi)-\frac{2\sin(\varphi)/\omega\tau}{1-e^{-\pi/\omega\tau}}\left(e^{-\pi/\omega\tau}-1\right)\right]-\frac{E_b}{\pi R}\pi$$

$$=\frac{V_m}{\pi Z}(2\cos\varphi+2\sin\varphi/\tan\varphi)-\frac{E_b}{R}=\frac{4V_m}{\pi Z}\cos\varphi-\frac{E_b}{R} \qquad (11.171)$$

$$I_{rms}=\sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}i_o^2(\theta)d\theta}=\sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\left(\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi)+\frac{2V_m}{Z}\sin(\varphi)\frac{e^{-\theta/\omega\tau}}{1-e^{-\pi/\omega\tau}}-\frac{E_b}{R}\right)^2d\theta}$$

$$(11.172)$$

(ب) حالة التيار المتقطع حيث $i_O(\omega t)\geq 0$ للفترة $\alpha<\omega t<\beta$ فقط:

يمكن في هذه الحالة التعبير عن A و i_O من المعادلة (168) عند شروط لحظة بداية فترة التوصيل حيث $i_O(\alpha)=0$ وكما يلي:

$$\alpha=\sin^{-1}\left(\frac{E_b}{V_m}\right), \qquad A=\left[\frac{E_b}{R}-\frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{\alpha/\omega\tau} \quad (11.173)$$

$$i_o(\theta)=\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi)-\frac{E_b}{R}+\left[\frac{E_b}{R}-\frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{(\alpha-\theta)/\omega\tau}$$

$$,\quad \alpha<\theta=\omega t<\beta \qquad (11.174)$$

ويمكن بالتعويض عن شروط نهاية فترة التوصيل حيث $i_O(\beta)$ $=0$ في المعادلة (174) ايجاد زاوية القطع β من المعادلة (175) الناتجة التالية بطريقة التجربة والخطأ او أي طريقة عددية بسيطة مناسبة انطلاقاً من قيمة ابتدائية $\beta=½\pi$:

$$\sin(\beta-\varphi)+b\,e^{(\alpha-\beta)/\omega\tau}-c=0,\quad c=\frac{E_bZ}{V_mR},\quad b=c-\sin(\alpha-\varphi)$$

$$(11.175)$$

ويمكن ايجاد متوسط وج.م.م تيار الخرج المتقطع لفترة عمل الدايود $\beta > \omega t > \alpha$ باعتبار $i_O=0$ لباقي الدورة كما يلي:

$$i_o(\theta) = \frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{E_b}{R} + \left[\frac{E_b}{R} - \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{(\alpha-\theta)/\omega\tau}$$

$$, \quad \alpha<\theta=\omega t<\beta \qquad (11.176)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^\beta i_o(\theta)\,d\theta = \frac{1}{\pi}\int_\alpha^\beta\left(\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{E_b}{R} + \left[\frac{E_b}{R} - \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{(\alpha-\theta)/\omega\tau}\right)d\theta$$

$$(11.177)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_\alpha^\beta i_o^2(\theta)\,d\theta} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_\alpha^\beta\left(\frac{V_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) - \frac{E_b}{R} + \left[\frac{E_b}{R} - \frac{V_m}{Z}\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{(\alpha-\theta)/\omega\tau}\right)^2 d\theta}$$

$$(11.178)$$

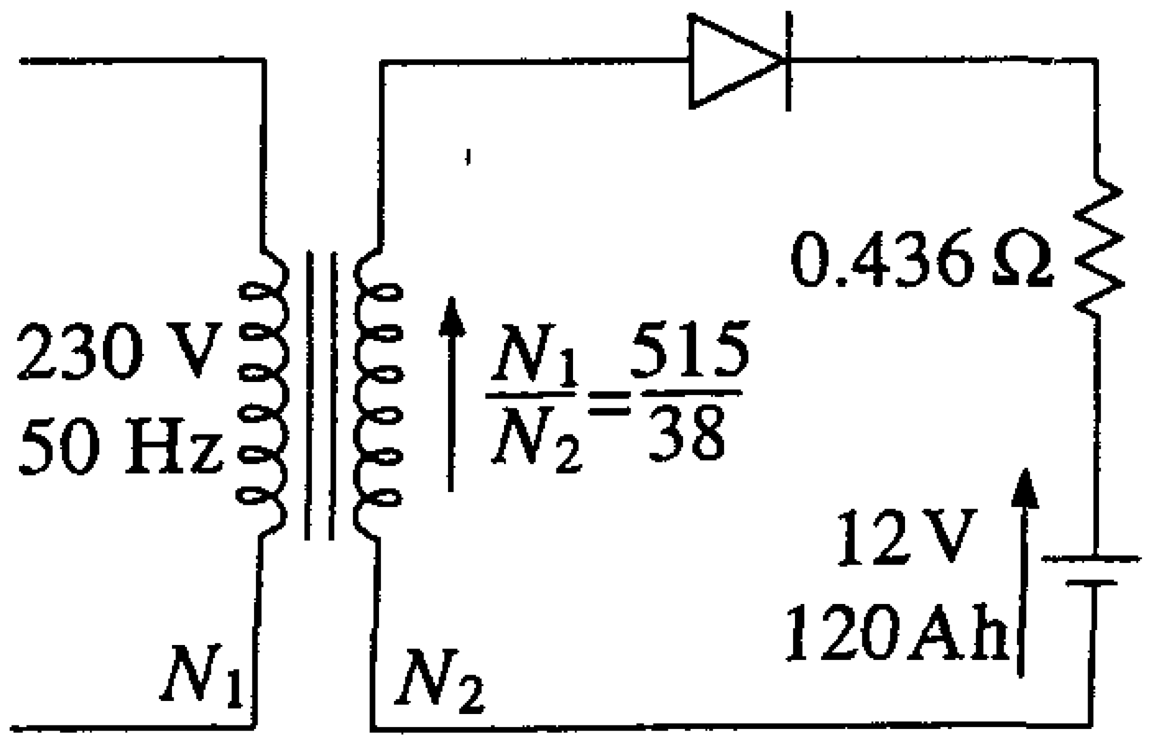
9-11 أمثلة محلولة:

1- يبين الشكل المقابل مقوم نصف موجي يستخدم لشحن بطارية من مصدر تيار متردد عبر محول خافض للجهد. احسب ما يلي:

1 – زاوية وفترة عمل الدايود والقيمة المتوسطة لجهد خرج المقوم.

2 – متوسط و ج.م.م تيار الخرج وزمن شحن البطارية بالساعات.

3– القدرة المسحوبة من المصدر والكفاءة والجهد العكسي الاعظم.



الحل:

a=515/38, V_1=230 V, F=50 Hz, E_b= 12 V,R =0.436 Ω, W_b=120 Ah, T = 1/F =20 ms ,$V_s = V_1 / a$, $V_m = \sqrt{2}\, V_s = \sqrt{2}\, V_1 / a = 24$ V

1 - $\alpha = \sin^{-1}(E_b/V_m) = \pi/6 = 30°$

$\beta = \pi - \alpha = 5\pi/6 = 150°$,

$\delta_d = \beta - \alpha = 2\pi / 3 = 120°$

$t_d = \delta_d T / 2\pi = 6.667$ ms

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}(\cos\alpha - \cos\beta) + \frac{E_b}{2\pi}(2\pi + \alpha - \beta) = 14.616 \text{ V}$$

2 - $I_{dc} = (V_{dc} - E_b)/R = 6$ A, $I_{rms} = (V_{rms} - E_b)/R$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{8\pi}(\sin 2\alpha - \sin 2\beta + 2\delta) + \frac{E_b^2}{2\pi}(2\pi - \alpha - \beta)}$$

V_{rms} =15.2215 V, I_{rms} = 7.3889 A

$W_b\,(Ah) = I_{dc}\,(A) \times t_c(hr)$, $t_c = W_b / I_{dc}$= 20 hr

3 - $P_{in} = P_b + P_r = E_b I_{dc} + I^2_{rms} R = 95.804$ W

$\eta = P_{out}/P_{in} = P_b/P_{in} = E_b I_{dc} / I^2_{rms} R = 75.15$

PRV = $V_m + E_b$ = 12 + 24 = 36 V

2- مغير نصف موجي احادي الطور مثالي محكوم يغذي حمولة مقاومية نقية بمتوسط تيار مستمر 1.783 A عند متوسط جهد مستمر يساوي 27% من القيمة العظمى الممكنة لمتوسط جهد

خرج المقوم من مصدر تيار متردد 220 V، 50 Hz. احسب ما يلي:

1 – مقدار مقاومة الحمولة وزاوية قدح الثايرستور.

2 – قيم ج.م.م جهد وتيار خرج المقوم لنفس الحمل.

الحل:

F=50 Hz, I_{dc}=1.783 A, $V_m=\sqrt{2}V_s = \sqrt{2}*220 = 311.127$ V,

$V_{dc} = 0.27*V_{dc(max)} = 0.27*V_m/\pi = 26.74$ V

1 - $R = V_{dc}/I_{dc} = 26.7394/1.783 = 14.997 \approx 15\ \Omega$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}(\cos\alpha + 1),\ \alpha = \cos^{-1}\left(\frac{2\pi V_{dc}}{V_m} - 1\right)$$

$$\alpha = \cos^{-1}(0.54-1) = \cos^{-1}(-0.46) = 117.39°$$

2 - $$V_{rms} = \frac{V_m}{2}\sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

$$= \frac{220}{\sqrt{2}}\sqrt{0.34785 - 0.130} = 72.607\ \text{V}$$

$$I_{rms} = V_{rms}/R = 4.815\ \text{A}$$

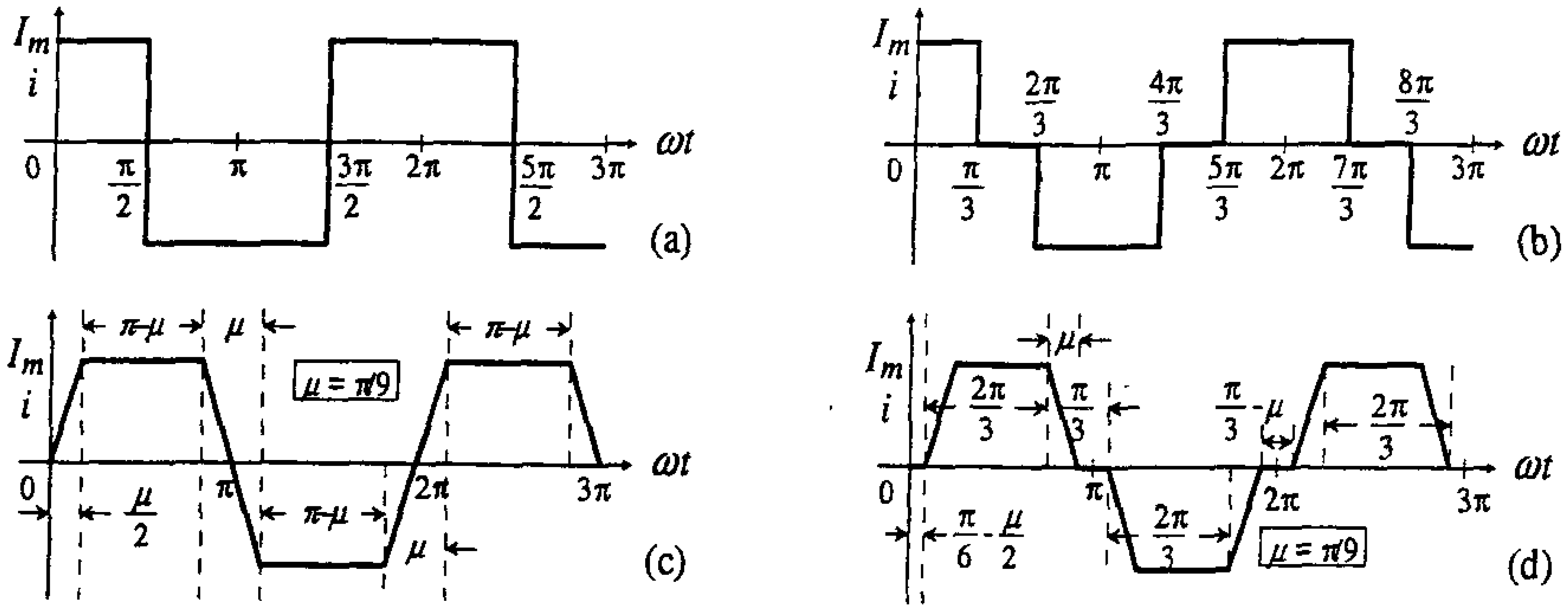
3 – استنتج القيمة المتوسط وقيم ج.م.م للمركبات الاساسية والتوافقية للاشكال الموجية المبنة في الاشكال (a) الى (b) التالية.

a) $I_{dc} = 0,\ I_{sn} = \frac{4I_m}{n\pi\sqrt{2}}\sin\frac{n\pi}{2},\ n = 1,3,5,$

b) $I_{dc} = 0,\ I_{sn} = \frac{4I_m}{n\pi\sqrt{2}}\sin\frac{n\pi}{3},\ n = 1,3,5$

$$c)\ I_{dc}=0,\ I_{sn}=\frac{8I_m}{n^2\mu\pi\sqrt{2}}\sin\frac{n\mu}{2},\ n=1,3,5,$$

$$d)\ I_{dc}=0,\ I_{sn}=\frac{8I_m}{n^2\mu\pi\sqrt{2}}\sin\frac{n\mu}{2}\cos\frac{n\pi}{6},\ n=1,3,5$$



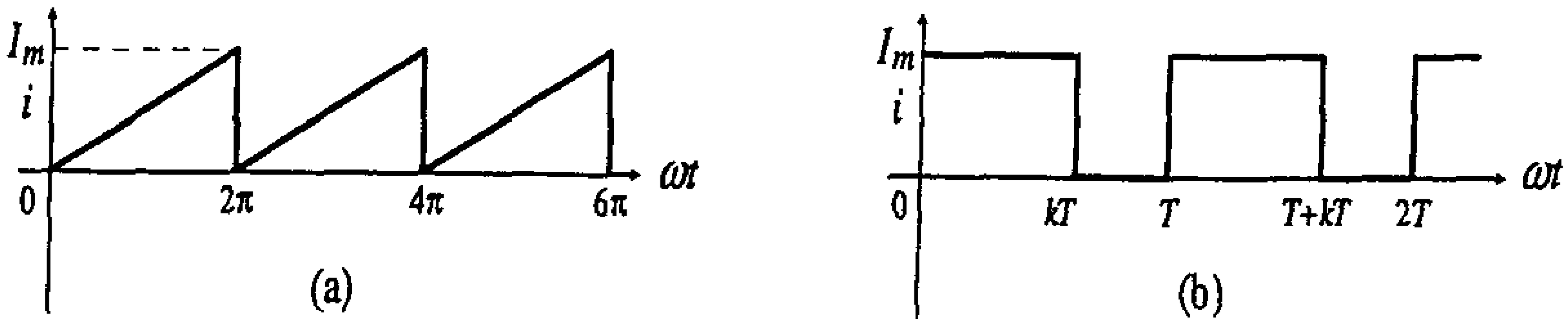
4 – استنتج قيم ج.م.م لدوال الاشكال الموجية المبينة في الاشكال (a) الى (d) السابقة واحسب التشوه التوافقي الكلي THD فيها.

(I_m , 48% ; $I_m\sqrt{2/3}$, 31% ; $I_m\sqrt{1-(4\mu/6\pi)}$, 39% ; $I_m\sqrt{(2\pi-\mu)/(3\pi)}$, 21.51%)

5 – استنتج متسلسلة فورير لدوال الاشكال الموجية المبينة في الاشكال (a) الى (b) ادناه واحسب معاملات التموج لهذه الدول.

$$a)\ i(\omega t)=\frac{I_m}{2}-\frac{I_m}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(n\omega t)}{n},\ 57.7\%$$

$$b)\ i(\omega t)=kI_m+\frac{2I_m}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(nk\pi)}{n}\cos(n\omega t),\ \sqrt{\frac{1}{k}-1}$$



6 – مصدر جهد ذو دالة ترددها 79.5775 Hz تمثلها متسلسلة فورير $v(t) = \{100 + 50\sin(\omega t) + 25\sin(3\omega t)\}$ V يغذي حمولة حثية تضم مقاومة 5 Ω ومحاثة 20 mH. احسب القدرة الفعالة التي يساهم بها كل من تيار مركبة التيار المستمر والمركبة الاساسية ومركبة التوافقية الثالثة لتغذية الحمولة. كذلك احسب ج.م.م تيار المصدر I_S واثبت ان القدرة I_S^2R التي تستهلكها الحمولة تساوي مجموع القدرات التي تساهم بها المركبات الثلاثة. (2 KW, 50 W, 1.689 W, 20.2568 A)

7 – تم تطبيق جهد جيبي دالته $v(t) = \{340\cos(\omega t)\}$ V على مغير قدرة احادي الطور يسحب تيار لاجيبي تمثله متسلسة فورير A $i(t) = \{8 + 15\cos(\omega t - 30°) + 6\cos(3\omega t + 45°) + 2\cos(5\omega t + 60°)\}$. اهمل فقد وهبوط جهد المغير واحسب القدرة المسحوبة والتشوه التوافي الكلي THD ومعامل قدرة الدخل للمغير. (2208.365 W, 86.09%, 0.6553)

8 – مصدر تيار متردد جهده 230 V, 50 Hz يغذى حمولة مقاومية 1.5 KΩ عن طريق مقوم نصف موجة مثالي. احسب مركبة التيار المستمر وج.م.م مركبة التيار المتردد في تيار الحمولة. كذلك احسب كل من القدرات الخارجة المستمرة والمترددة والقدرة المترددة الداخلة. (69.024 mA, 108.423.mA, 7.147 W, 17.633 W, 24.9373 W)

9 – مقوم موجة كاملة يغذى من محول ذو مآخذ نصفي جهده الثانوي 600 V ويغذى حمولة مقاومية 2.5 KΩ. احسب مركبة التيار المستمر وج.م.م مركبة التيار المتردد في تيار الحمولة والقدرات المستمرة والمترددة الخارجة. . كذلك احسب تيار المحول والقدرة

المترددة الداخلة. (108.04 mA, 120.0 mA, 29.18 W, 36.0 W, 84.853 A, 50.912 W)

10 – مقوم نصف موجة مثالي يغذى حمولة مقاومية 5 KΩ من مصدر تيار متردد 325 V تم توصيل مقاومة 125 Ω على التوالى مع الدايود للحد من التيار. احسب مركبتي تيار الحمولة المستمرة والمترددة والقدرة الداخلة وكفاءة التقويم وكل من معاملات التموج وتنظيم الجهد الحمولة.
(28.55 mA, 44.81.mA, 14.57 W, 39.54%, 2.44%)

11 – مقوم موجة كاملة يغذى من محول ذو مآخذ نصفي جهده الثانوي 600 V ويغذى حمولة مقاومية تسحب تيار مستمر 10 A. فأذا كانت دايودات المقوم ذات مقاومة توصيل امامي ثابتة قدرها 1 Ω (يمكن تمثلها على التوالى مع الدايود)، احسب مقاومة الحمولة وكفاءة التقويم وجهد الانحياز العكسي الذي يتعرض له الدايود اثناء توقفه. (26 Ω, 78.05%, 832.8 V)

12 – مقوم موجة كاملة قنطري يغذى من محول جهده الثانوي 20 V ويغذى حمولة مقاومية تسحب تيار مستمر 10 A. فأذا كانت دايودات المقوم الاربعة ذات مقاومة توصيل امامي ثابتة قدرها 0.1 Ω، احسب مقاومة الحمولة وكفاءة التقويم (لاحظ ان مسار تيار الخرج يضم اثنان من الدايودات على التوالى مع مقاومة الحمولة).
(1.6 Ω, 72.05%)

13 – مقوم نصف موجة مثالي يستمد طاقته من مصدر جهد جيبي دالة جهده $v(t) = \{100\sin(377t)\}$ V ويغذي حمولة RL مقاومتها 100 Ω ومحاثتها 0.1 H. اشتق معادلة تيار الخرج اللحظية واحسب كل من متوسط وج.م.م التيار والقدرة الخارجة ومعامل القدرة.
[$i(\omega t)=0.936\sin(\omega t-20.7)+0.331e^{-\omega t/0.377}$ A, 0.308 A, 0.474 A, 22.4 W, o.67]

14 – مقوم موجة كاملة مثالي يغذي حمولة RL من مصدر جهد جيبي. استنتج مستخدماً متسلسلة فورير معادلة جهد وتيار الخرج اللحظيين مقتصراً على اهم اول مركبتين توافقيتين فقط ومن ثم عبر عن معامل التموج بدلالة R و L باعتبار اهم اول مركبة توافقية فقط. واذا كان التردد 60 Hz والمقاومة 500 Ω، احسب قيمة المحاثة المطلوبة لمنع معامل التموج من تجاوز 5%.

$$v(t)=\frac{2V_m}{\pi}\left[1-\sum_{n=2,4..}^{\infty}\frac{2\cos(n\omega t)}{(n-1)(n+1)}\right],\ i(t)=\frac{2V_m}{\pi}\left[\frac{1}{R}-\sum_{n=2,4..}^{\infty}\frac{2\cos(n\omega t-\varphi_n)}{(n-1)(n+1)Z_n}\right],\ RF=\frac{\sqrt{2}/3}{\sqrt{1+(2\omega L/R)^2}},\ 6.22H$$

15 – مقوم موجة كاملة قنطري مرشح C يغذي حمولة مقاومية 500 Ω من مصدر 120 V ، 60 Hz. استنتج تقريبياً العلاقة الممكن استخدامها لحساب معامل التموج ومتوسط جهد الخرج بدلالة R و C واحسب قيمة المتسعة المطلوبة لمنع معامل التموج من تجاوز 5% وجهد الخرج. [$RF=1/[(4fRC-1)\sqrt{2}]$, $V_{dc}=V_m(1-1/4fRC)$, 126.2 μf, 158.49 V]

16 – مقوم نصف موجة مثالي يستخدم لشحن بطارية مقنناتها 12 V ، 36 Wh من مصدر جهد جيبي ذروته 24 V. احسب قيمة المقاومة المطلوب توصيلها على التوالي مع البطارية لمنع تيار الشحن من تجاوز 1 A والزمن الذ يستغرقه شحن البطارية. كذلك احسب تقريبياً القيمة العظمى لتيار الدايود اذا تم توصيل البطارية خطاءً بقطبية معكوسة. (2.616 Ω, 13.761A)

17– مقوم نصف موجة مثالي يستخدم لتغذية محرك تيار مستمر ق.د.ك منتجه 240 V من مصدر 240 V ، 50 Hz. فاذا كانت مقومة ومحاثة منتج المحرك 5 Ω و 16 mH على الترتيب. احسب الزاوية

التي يستمر خلالها الدايود في العمل ومتوسط جهد وتيار الخرج المار للمحرك.(161°, 251 V, 18.02A)

18 – مصدر تيار متردد يغذى حمولة مقاومية نقية محددة عن طريق مغير نصف موجة احادي الطور محكوم مثالي الخصائص. فأذا كانت زاوية القدح 90^o احسب كل من كفاءة التقويم، عامل الشكل، عامل التموج، عامل الانتفاع لمحول التغذية، وجهد الانحياز العكسي الاعظم الممكن ان يتعرض له الثايرستور. $(20.3\%, 222.1\%, 198.3\%, 10.1\%, V_m)$

19 – مغير نصف موجة احادي الطور محكوم مثالي يغذى حمولة مقاومية $20\ \Omega$ من مصدر تيار متردد $220\ V$، $50\ Hz$. فأذا كانت زاوية القدح 30^o احسب كل من كفاءة التقويم، عامل الشكل، عامل التموج، عامل الانتفاع لمحول التغذية، وجهد الانحياز العكسي الاعظم الممكن ان يتعرض له الثايرستور. (36.3%, 165.9%, 132.3%, 25.3%, 311.13 V)

20 – مغير نصف موجة احادي الطور محكوم يستخدم دايود اطلاق ويغذى حمولة حثية تتكون من مقاومة $20\ \Omega$ على التوالي مع محاثة $10\ mH$ من مصدر تيار متردد $220\ V$، $50\ Hz$. فأذا كانت زاوية القدح 40^o احسب معاملات المركبة الاساسية a_1 و b_1 لمتسلسلة فورير لجهد الخرج وج.م.م المركبة الاساسية لتيار الخرج. (20.46, 145.4, 5.13 A)

21 – مغير موجة كاملة نصف محكوم يغذى حمولة حثية تضم مقاومة $20\ \Omega$ على التوالي مع محاثة $10\ mH$ ومصدر ق.د.ك مستمرة $20\ V$ من مصدر تيار متردد $220\ V$، $50\ Hz$. فأذا كانت زاوية القدح $\pi/8$ احسب معاملات المركبة الادنى a_2 و b_2 لمتسلسلة

فورير لجهد الخرج وج.م.م المركبة الثانية لتيار الخرج. - ,144.9)
7.32, 4.9 A)

22 – مغير موجة كاملة محكوم كلياً يغذى حمولة حثية تضم مقاومة $10\ \Omega$ على التوالي مع محاثة 10 mH من مصدر تيار متردد 120 V، 60 Hz. فأذا كان جهد الخرج 25٪ من جهد الخرج الاعظم والتيار متصلاً احسب كل من زاوية القدح، متوسط وج.م.م تيار الحمولة وتيار الثايرستور وقدرة تيار الدخل. $(75.5\ \Omega$, 2.7 A, 11.23 A, 1.35 A, 7.94 A, 0.936)

23 – مغير موجة كاملة محكوم كلياً يستخدم دايود اطلاق يغذى حمولة حثية تضم مقاومة $4\ \Omega$ على التوالي مع محاثة 500 mH من مصدر تيار متردد 240 V، 50 Hz. فأذا كانت زاوية القدح 30^o احسب متوسط وج.م.م جهد وتيار الخرج ومتوسط تيارات كل من الثايرستور ودايود الاطلاق. (201.6 V, 50.4 A, 229.3 V, 1.46 A, 21.0 A, 8.4 A)

24 – مغير نصف موجة ثلاثي الطور محكوم يغذى حمولة حثية من مصدر تيار متردد 120 V، 60 Hz. فأذا كانت محاثة الحمولة كبيرة بحيث يمكن افتراض ان تيار الخرج متصلاً وخالي من التموجات وكانت زاوية القدح 60^o ارسم تقريبياً الشكل الموجي لجهد الخرج واحسب متوسط وج.م.م جهد الخرج للمقوم. (70.17 V, 106.88 V)

انتهى بحمد الله

الرموز المستخدمة فى الكتاب

ت	الرمز	المصطلح العلمي
1	$i(t)$	القيمة اللحظية للتيار الكهربائي
2	$v(t)$	القيمة اللحظية للجهد الكهربائي
3	$p(t)$	القيمة اللحظية للقدرة الكهربائية الفعالة
4	I_{rms}	القيمة الفعالة للتيار الكهربائي
5	V_{rms}	القيمة الفعالة للجهد الكهربائي
6	P_{rms}	القيمة الفعالة للقدرة الكهربائية
7	S	القدرة الكهربائية الظاهرية
8	Q	القدرة الكهربائية غير الفعالة
9	R	المقاومة الكهربائية
10	Z	المعاوقة الكهربائية
11	X	المفاعلة الكهربائية
12	X_m	المفاعلة المغناطيسية
13	R_c	المقاومة الوهمية وتمثل الفقد فى القلب الحديدي
14	I_c	التيار المار فى القلب الحديدي
15	I_m	التيار المار فى الفرع المغناطيسي
16	I_o	تيار الدائرة المفتوحة

ت	الرمز	المصطلح العلمي
17	P_{out}	القدرة الكهربائية الخارجة
18	P_{in}	القدرة الكهربائية الداخلة
19	W	الطاقة الكهربائية
20	A	مساحة الوسط
21	Ψ	تشابك الفيض المغناطيسي
22	N	عدد لفات الملف
23	Φ	الفيض المغناطيسي
24	M	شدة القطب المغناطيسي
25	μr	النفاذية النسبية للوسط
26	π	النسبة الرياضية الثابتة
27	μ_o	نفادية الفراغ
28	η	الكفاءة
29	H	الاجهاد المغناطيسي
30	B	كثافة الفيض المغناطيسي
31	E	المجال الكهربائي
32	F	القوة المغناطيسية
33	e	قوة الدافعة الكهربائية المحتثة

ت	الرمز	المصطلح العلمي
34	E_a	القوة الدافعة الكهربائية
35	T	العزم الكهربائي
36	S	عدد الشقوب
37	R_a	مقاومة دائرة المنتج
38	R_r	مقاومة العضو الدوائر فى المحرك
39	R_1	مقاومة الدائرة الابتدائية
40	R_2	المقاومة الدائرة الثانوية
41	X_1	ممانعة الدائرة الابتدائية
42	X_2	ممانعة الدائرة الثانوية
43	L	المحاثة الكهربائية
44	L22,L11	المحاثة الذاتية للملف
45	M21	المحاثة التبادلية بين ملفين
46	D	ديواد الاطلاق
47	IGBT	الترانزيستور ثنائي القطبية معزول البوابة
48	BJT	ترانزيستور القوى
49	C	المكثف
50	FF	عامل الشكل

ت	الرمز	المصطلح العلمي
51	UF	عامل الانتفاع
52	RF	عامل التموج
53	α	زاوية القدح للثايرستور
54	ζ	نسبة الاخماد
55	β	زاوية القطع
56	DF	عامل الازاحة
57	HF	عامل التوافقي
58	TDH	التشوه التوافقي الكلي
59	DHF	عامل التشوه التوافقي

المراجـــع

المراجع العربية

1- محمد زكى خضر وآخرون: "المكائن الكهربائية"

2- مكائن التيار المتناوب، د. باسل محمد سعيد ود. ضياء على النعمة، جامعة الموصل / العراق .

3- على رفعت حمدى وعبدالمنعم موسى. "اسس الهندسة الكهربية وتقنيتها"

المراجع الاجنبية

1- Edward Hughes, "Electrical Technology"
2- Fitzgerald, Kingsley, & Umans, "Electrical Machinery", McGraw-Hill International Book Co.
3- M G Say, "A.C. Machines", Pitman.
4- M G Say, "D.C. Machines", Pitman .
5- E. Hughes, "Electrical Technology"
6- R Errickson, "Introductin to Power Electronics," John Wiley, New York, 2000.
7- B.K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1986.
8- B.K. Bose, "Adjustable speed AC drives—A technology status review," Proc. IEEE, vol. 70, pp. 116–135, Feb. 1982.
9- B.K. Bose, Modern Power Electronics, New York: IEEE Press, 1992.
10- J.M.D. Murphy and F.G. Turnbull, Power Electronic Control of AC Motors, New York: Pergamon Press, 1988.
11- P.C. Sen, Thyristor DC Drives, New York: John Wiley, 1981.
12- K. Thorborg, "Power Electronics", Prentice-Hall International (UK) Ltd., 1988.

المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
41	2.2- بنية محول القوى
44	1.2.2- لفائف المحول
45	2.2.2 – عوازل المحول
47	3.2.2 – تبريد المحول
48	3.2 – المحول المثالي
49	1.3.2 – المحول المثالى اثناء اللاحمل
52	2.3.2 – المحول المثالى اثناء الحمل
54	4.2 – المحول الحقيقي
56	1.4.2- الدائرة المكافئة للمحول الحقيقي
59	5.2- بيانات واختبارات المحول
60	1.5.2- اختبار القطبية
62	2.5.2 – اختبار اللاحمل
63	3.5.2 – اختبار القصر
65	4.5.2 – اختبار التعاكس
66	5.5.2 – فصل مركبات الحديد
67	6.2 – كفاءة المحول
70	7.2 – تنظيم جهد المحول
73	8.2 – النظام الواحدي للقياس
76	9.2 – المحول الذاتي

الموضوع	رقم الصفحة

الموضوع	رقم الصفحة
الفصل السادس	
الآلات الحثية ثلاثية الطور	245
6- 1- المقدمة	247
6- 2- بنية المحركات الحثية	249
6- 3- المجال المغناطيسي الدوار	252
6- 4- ق.د.م و ق.د.ك لفائف العضو الساكن	254
6- 4- 1- ق.د.م اللفائف الموزعة	257
6- 4- 1- ق.د.ك اللفائف المتوزعة	259
6- 5- سلوك المحرك الحثي ثلاثي الطور	261
6- 6- نمذجة المحرك الحثي ثلاثي الطور	264
6- 6- 1- تبسيط الدائرة المكافئة للمحرك الحثي	269
6- 7- خاصية العزم للمحرك الحثي	272
6- 8- اختبارات المحرك الحثي	274
6- 9- كفاءة المحرك الحثي	276
6- 10- بدء حركة المحرك الحثي	279
6- 11- التحكم في سرعة المحرك الحثي	282
6- 12- أمثلة محلولة	284

الموضوع	رقم الصفحة
الفصل السابع	
الآلات التزامنية ثلاثية الطور	289

الموضوع	رقم الصفحة
التزامنية	
7- 16- أمثلة محلولة	340
الفصل الثامن	
الآلات احادية الطور	345
8- 1- المقدمة	347
8- 2- المحركات الحثية احادية الطور	350
8- 2- 1- عزم المحرك الحثي احادي الطور اثناء الدوران	353
8- 2- 2- نمذجة المحرك الحثي احادي الطور	356
8- 2- 3- اختبارات المحرك الحثي احادي الطور	360
8- 2- 4- تقييم اداء المحرك الحثي احادي الطور	363
8- 2- 5- بدء المحركات الحثية احادية الطور	365
8- 2- 6- تصنيف المحركات الحثية احادية الطور	368
8- 2- 7- الدائرة المكافئة لمحركات المكثف الحثية احادية الطور	373
8- 3- أمثلة محلولة	376

الموضوع	رقم الصفحة
الفصل التاسع	
الالات الخاصة	381
9- 1- المقدمة	383
9- 2- المحركات العامة ومحركات التنافر احادية الطور	383
9- 3- المحركات التزامنية احادية الطور.	385
9- 3- 1- محركات الممانعة التزامنية	386
9- 3- 2- محركات التخلف التزامنية	388
9- 3- 3- محركات المغناطيس الدائم التزامنية	390
الفصل العاشر	
مدخل الى ديناميكا الآلات	391
10- 1- المقدمة	393
10- 2- سلوك آلات التيار المستمر	393
10- 2- 1- السلوك العابر لمولد التيار المستمر	394
10- 2- 1- 1- السلوك العابر لدائرة المجال	395
10- 2- 1- 2- السلوك العابر لدائرة المنتج.	397
10- 2- 2- السلوك الديناميكي لمحرك	400

الموضوع	رقم الصفحة
التيار المستمر	
10- 2- 2- 1 السلوك العابر لدائرة المجال	402
10- 2- 2- 2- 11السلوك الديناميكي للعضو الدوار	403
10- 3- سلوك الآلات التزامنية	407
10- 3- 1- المولد التزامني ذو الاقطاب البارزة	410
10- 3- 2- انظمة التحكم في المولد وخريطة التشغيل	413
10- 3- 3- تأثير القصر ثلاثي الطور	416
10- 3- 3- 1- مركبة التيار المستمر في تيار القصر	419
10- 3- 3- 2- . تيار القصر في المولد المحمّل	420
10- 3- 4- معادلة حركة الآلة التزامنية	421
10- 3- 4- 1- ديناميكا الاضطرابات الصغيرة	427
10- 4- السلوك العابر للمحركات الحثية	429
10- 5- أمثلة محلولة	430

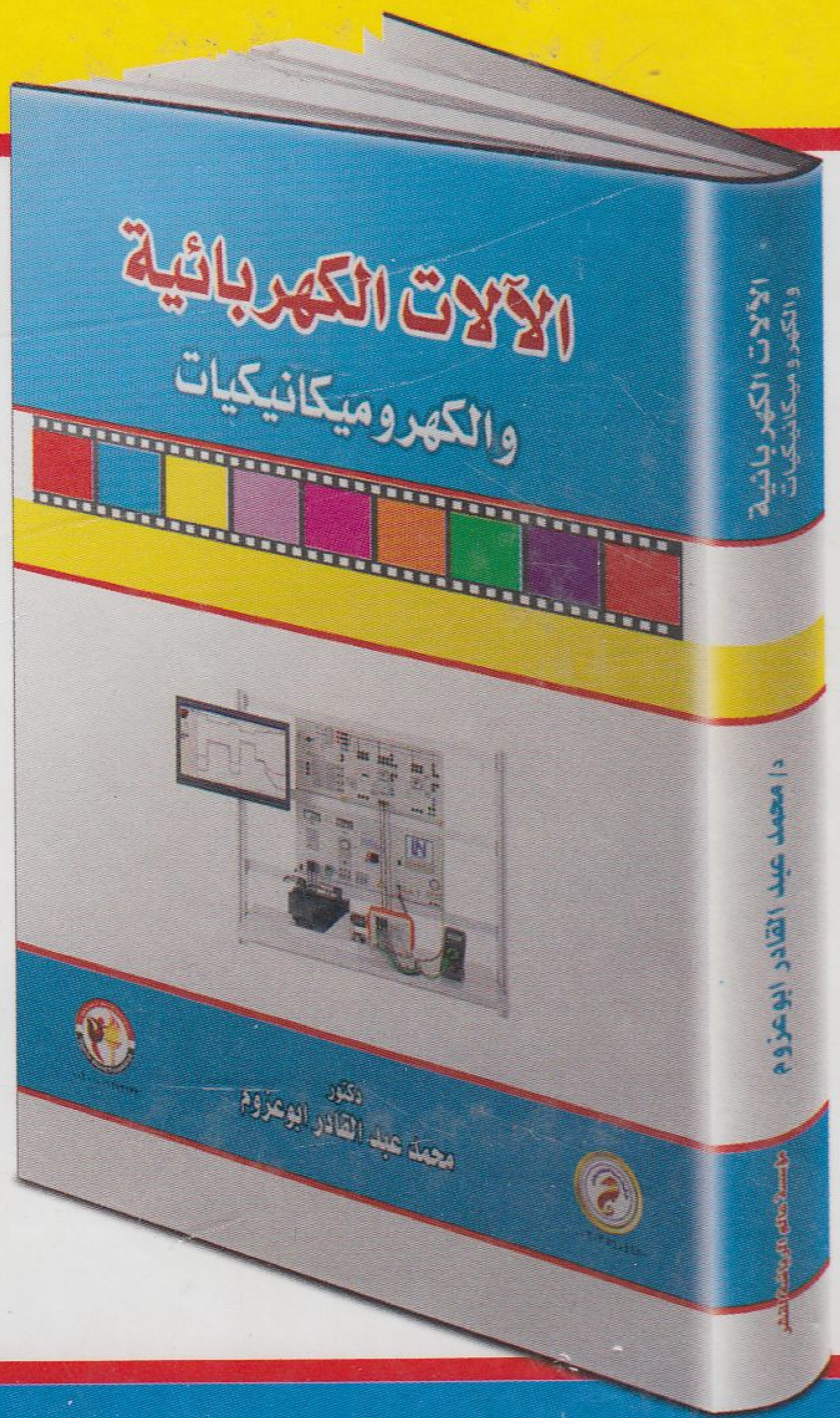
الموضوع	رقم الصفحة
الفصل الحادي عشر	
الكترونيات القدرة	435
11- 1- المقدمة	437
11- 2- خصائص الوصل/القطع لأدوات الكترونيات القوى	438
11- 2- 1- دايود القوى	439
11- 2- 2- دايود PNPN	440
11- 2- 3- الدياك	442
11- 2- 4- ثايرستور SCR	442
11- 2- 5- ثايرستور GTO	444
11- 2- 6- الترياك	446
11- 2- 7- ترانزيستور القوى (BJT)	446
11- 2- 8- ترانزيستور MOSFET	448
11- 2- 9- ترانزيستور IGBT	449
11- 2- 10- مقارنة قدرة وسرعة ادوات الكترونيات القدرة	450
11- 3- تصنيف وتقييم مفاتيح ودوائر الكترونيات القوى	451
11- 3- 1- تقييم اداء دوائر الكترونيات القوى	454

رقم الصفحة	الموضوع

تم بحمد الله

رقم الإيـداع : 2014/5896
الترقيم الدولى : 978-977-735-130-0

الناشر
دار الوفاء لدنيا الطباعة والنشر
تليفاكس: 5404480 – الإسكندرية



ISBN: 977-735-130-0
9 789777 351300

مؤسسة عالم الرياضة للنشر
٥٩ ش محمود صدقى متفرع من العيسوى سيدى بشر - الإسكندرية